

## Metody pomiaru strat mocy w rdzeniach dławików

**Streszczenie.** W artykule omówiono źródła strat mocy występujących w materiałach magnetycznych wykorzystywanych do budowy dławików lub transformatorów oraz przeanalizowano wybrane literaturowe metody pomiaru tych strat. Opisano wybrane z tych metod i wskazano ich ograniczenia wynikające z zastosowania rozważanych metod pomiarowych. Wykazano potrzebę opracowania nowej metody pomiarowej.

**Abstract.** The article discusses the sources of power losses occurring in magnetic materials used to build the inductor or the transformers. The paper analyses selected literature methods for measuring these losses and presents the limitation of proposed methods. The overview of literature indicates the need to develop a new measurement method (**The methods of measurement the power losses in the core of inductor**).

**Słowa kluczowe:** materiały ferromagnetyczne, metody pomiarowe, dławik, straty mocy.

**Keywords:** ferromagnetic materials, measurement methods, inductor, power losses.

### Wprowadzenie

Elementy magnetyczne takie jak dławiki czy transformatory są jednymi z podstawowych komponentów układów przetwarzania energii elektrycznej [1, 2, 3]. Rosnące zainteresowanie układami umożliwiającymi przenoszenie dużej mocy przy zachowaniu wysokiej sprawności energetycznej oraz stosunkowo niewielkich rozmiarów stawia przed projektantami tego typu układów ogromne wyzwanie. Dążenie do miniaturyzacji urządzeń wymaga zwiększenia częstotliwości kluczowania elementów półprzewodnikowych oraz magnetycznych [1]. Jak wiadomo z literatury [2, 4 - 8], częstotliwość ta istotnie wpływa na straty mocy w elementach magnetycznych i w konsekwencji na sprawność rozważanego układu.

Całkowite straty mocy w elementach magnetycznych wynikają zarówno ze strat powstających w uzwojeniu, jak i ze strat w rdzeniu ferromagnetycznym [1, 4, 5, 9]. W celu wyznaczenia mocy wydzielanej w elemencie magnetycznym niezbędne jest przeprowadzenie odpowiednich pomiarów uwzględniających parametry związane z układem aplikacyjnym, np. częstotliwość pracy, czy kształt przebiegu indukcji magnetycznej [4, 5].

Jak wiadomo z prac [4, 10] oraz danych podawanych przez producentów rdzeni ferromagnetycznych [11] wartość strat mocy na jednostkę objętości mierzona jest przy pobudzeniu badanego elementu sygnałem sinusoidalnym, podczas gdy przebieg indukcji magnetycznej w układach przetwarzania energii elektrycznej, np. w przetwornicach dc-dc jest trójkątny [10].

Z kolei, z pracy [7] wynika, że kształt przebiegu indukcji magnetycznej istotnie wpływa na wartość strat mocy w rdzeniu ferromagnetycznym przy tej samej częstotliwości i amplitudzie indukcji magnetycznej. Niezbędne zatem jest wybranie odpowiedniej metody pomiarowej dostosowanej do konkretnej aplikacji, w której będzie pracował dławik lub transformator.

W niniejszej pracy omówiono i porównano literaturowe metody pomiaru strat mocy w materiałach magnetycznych.

### Straty w materiałach magnetycznych

Straty mocy w elementach magnetycznych można podzielić na straty związane z zastosowanym materiałem ferromagnetycznym wykorzystanym do budowy rdzenia tego elementu oraz straty w uzwojeniu [1, 4]. Straty w materiałach magnetycznych można podzielić na wiroprądowe, histerezyowe i pozostałościowe [1, 6]. Udział wskazanych składników strat mocy zależy w znacznym stopniu od rodzaju materiału magnetycznego, częstotliwości i wartości międzyszczytowej tego przebiegu oraz temperatury [1, 4, 6]. Podstawową zależnością opisującą

straty mocy w materiałach ferromagnetycznych jest wzór Steinmetza o postaci [4, 6]:

$$(1) \quad P_R = k \cdot f^\alpha \cdot B_m^\beta$$

gdzie  $k$ ,  $\alpha$  oraz  $\beta$  są parametrami materiałowymi,  $f$  to częstotliwość, a  $B_m$  – amplituda indukcji magnetycznej.

Niestety ograniczeniem zależności (1) jest fakt, że jest ona słuszna tylko wtedy, gdy przebieg indukcji magnetycznej jest sinusoidalny, tymczasem w układach zasilających, w których pracują dławiki zawierające rdzenie ferromagnetyczne kształt przebiegu indukcji magnetycznej jest trójkątny. Tym samym niezbędne jest precyzyjne określenie strat mocy w materiałach ferromagnetycznych elementów magnetycznych pracujących w układach przetwarzania energii elektrycznej.

### Klasyczne pomiaru strat w materiałach magnetycznych

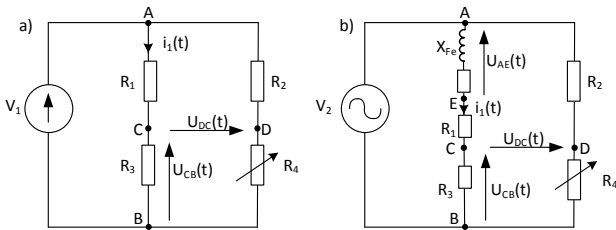
Jak wspomniano wcześniej pomiar strat mocy w materiałach ferromagnetycznych powinien uwzględniać przeznaczenie elementu magnetycznego, a tym samym zakres jego częstotliwości pracy.

Klasyczną metodą pomiaru strat mocy w materiałach ferromagnetycznych jest proponowany w normach [12] pomiar strat mocy za pomocą watomierza dla próbki umieszczonej w aparacie Epsteina lub próbki toroidalnej. Metody te są powszechnie stosowane, jednak cechuje je szereg wad, takich jak wąski zakres mierzonych mocy wynikający z konieczności przeprowadzenia badania na próbkach o niewielkiej masie oraz bardzo wąski zakres częstotliwości często obejmujący częstotliwości bliskie sieciowej (50 – 60 Hz) i ograniczona dokładność.

Z kolei, jedną z najpopularniejszych metod pomiaru strat mocy w materiałach ferromagnetycznych jest pomiar pętli histerezy, której pole powierzchni jest proporcjonalne do mocy traconej w rdzeniu dławika lub transformatora. Ograniczeniem tej metody jest fakt, że nie uwzględnia ona pozostałych składników strat mocy w materiałach ferromagnetycznych, np.: strat na prądy wirowe oraz strat pozostałościowych. Przy realizacji tej metody stosuje się sinusoidalny przebieg indukcji pola magnetycznego [4, 10, 13, 14].

### Metoda pomiarowa z pracy [13]

W pracy [13] zaproponowano metodę pomiaru strat mocy w materiałach nanokrystalicznych i amorficznych przy wykorzystaniu metody mostkowej. Schemat układu pomiarowego do realizacji tej metody przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Układ do pomiaru strat mocy w rdzeniu ferromagnetycznym bazujący na metodzie mostkowej

W układzie przedstawionym na rysunku 1 pomiędzy zaciskami A i B umieszczona jest badana próbka składająca się z rdzenia ferromagnetycznego oraz uzwojenia. Rezystor  $R_{cu}$  jest elementem liniowym i reprezentuje straty mocy w uzwojeniu oraz ma wartość równą rezystancji uzwojenia, rezystor  $R_{Fe}$  jest rezystorem nieliniowym reprezentującym straty mocy w rdzeniu badanej próbki, co oznacza, że jego wartość zależy od chwilowej wartości prądu. Z kolei, rezystor  $R_3$  pełni funkcję rezystora bocznikującego. Wartość rezystancji  $R_{cu}$  powinna zostać zmierzona przy zasilaniu układu napięciem stałym (rys.1a). Z kolei, do zmierzenia strat w rdzeniu mostek powinien być zasilony z generatora o regulowanej częstotliwości i amplitudzie napięcia zasilającego (rys.1b). Podczas pobudzania badanego elementu sygnałem zmiennym moc wydzielana w rdzeniu jest równa średniej wartości mocy chwilowej wydzielanej na elementach  $R_{Fe}$  i  $X_{Fe}$ , zgodnie z zależnością [13]:

$$(2) \quad P_{Fe} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_{AE}(t) \cdot i_1(t) dt$$

gdzie  $T$  oznacza okres sygnału pobudzającego,  $u_{AE}$  - spadek napięcia na elementach  $X_{Fe}$  oraz  $R_{Fe}$ , zaś  $i_1(t)$  - wartość chwilową prądu w gałęzi AC.

Wyrażając zależność (2) jako funkcję napięcia niezrównoważenia mostka  $u_{DC}(t)$  i spadku napięcia na rezystorze bocznikującym  $u_{CB}(t)$  uzyskano zależność opisującą straty mocy w rdzeniu o postaci [13]:

$$(3) \quad P_{Fe} = \frac{1}{T} \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_3^2} \cdot \int_0^T u_{DC}(t) \cdot u_{CB}(t) dt$$

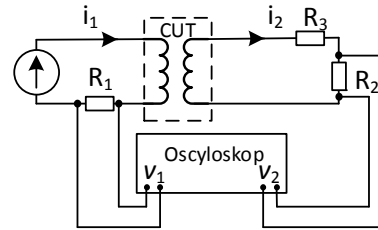
Zaprezentowanie w pracy [1] wyniki pomiaru porównano wynikami uzyskanymi za pomocą metody pomiaru strat w oparciu o powierzchnię pętli histerezy uzyskując bardzo dobrą zgodność między nimi. Ograniczeniem zaproponowanej metody jest niska częstotliwość sygnału pobudzającego. Badania przeprowadzone w pracy [13] realizowane były przy pobudzeniu rozważanego elementu sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości sieciowej (50 Hz).

### Metoda pomiarowa z pracy [14]

Z kolei, w pracy [14] zaproponowano metodę pomiaru strat mocy w rdzeniach ferromagnetycznych bazującą na metodzie watomierzowej, opisaną powyżej, proponując rozszerzenie układu pomiarowego o dodatkowe komponenty. Schemat pomiarowy stosowany w tej metodzie przedstawiono na rys.2. Jak można zauważyć, do pomiaru strat w materiale ferromagnetycznym wykorzystano transformator, którego uzwojenie pierwotne pobudzane jest z generatora przebiegów przemiennych.

Nowym elementem metody jest zastosowanie rezystorów  $R_2$  i  $R_3$  oraz opracowanie oprogramowania uwzględniającego m.in.: rozmiary rdzenia, indukcyjności badanego elementu, liczbę zwojów, częstotliwość i kształt sygnału pobudzającego. Autorzy metody założyli, że liczba

zwojów uzwojenia pierwotnego jest równa liczbie zwojów uzwojenia wtórnego, a uzwojenia są nawinięte bifilarnie. Moc tracona w rdzeniu wyznaczona jest z zależności [14]



Rys.2. Układ do pomiaru strat mocy w rdzeniu ferromagnetycznym bazujący na metodzie watomierzowej

$$(4) \quad P_{core} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_m \cdot u_m dt$$

gdzie  $u_m$  to napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym, a  $i_m$  to prąd magnesujący, opisany wzorem o postaci [14]:

$$(5) \quad i_m = (i_1 - i_2) = \frac{v_1}{R_{e1}} - \frac{v_2}{R_{e2}}$$

przy czym  $v_1$  oraz  $v_2$  to wartości napięcia mierzonego po stronie pierwotnej i po stronie wtórnej transformatora, natomiast  $R_{e1}$  oraz  $R_{e2}$  to rezystancje ekwiwalentne uwzględniające istnienie równoległych rezystancji dołączonych odpowiednio do rezystora  $R_1$  oraz  $R_2$ , które uwzględniają rezystancję wejściową kanałów oscyloskopu, rezystancję sondy pasywnej oraz efektywną długość drogi magnetycznej rdzenia  $l_{Fe}$ . Dodatkowo, ustawiając odpowiednią wartość tłumienia na wejściu oscyloskopu można kontrolować amplitudę natężenia pola magnetycznego zgodnie z zależnością:

$$(6) \quad H = \frac{N_{im}}{l_{Fe}} = \frac{N \cdot v_1}{l_{Fe} \cdot R_{e1}} - \frac{N \cdot v_2}{l_{Fe} \cdot R_{e2}}$$

a zależność indukowanego napięcia w uzwojeniu wtórnym przyjmuje postać:

$$(7) \quad u_m = \frac{R_3 + R_{e2}}{R_{e2}}$$

Największą wadą metod watomierzowych jest dokładność pomiaru fazy pomiędzy sygnałami po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora ( $v_1$  i  $v_2$ ). Jak wynika z badań przedstawionych w pracy [14], jeśli przesunięcie fazowe pomierzy napięciem  $v_1$  i  $v_2$  wynoszące  $87^\circ$  zmieni się o  $1^\circ$ , to błąd pomiaru strat mocy w rdzeniu wyniesie ponad 20%. Stąd niezbędne jest zastosowanie odpowiedniej aparatury pomiarowej pozwalającej na zmniejszenie błędów lub zastosowanie innej metody pomiarowej.

### Metoda pomiarowa z pracy [15]

W pracy [15] porównano trzy metody pomiaru mocy strat w materiałach magnetycznych dedykowane rdzeniom wykonanym z laminowanych blach. Dużą uwagę w cytowanej pracy poświęcono pomiarom strat mocy w materiałach magnetycznych za pomocą aparatu Epstein'a. W cytowanej pracy zaproponowano nowe rozwiązanie wykorzystujące ten aparat o mniejszych rozmiarach i możliwości wyznaczenia strat mocy w zakresie wyższych wartości częstotliwości dochodzących do 4 kHz oraz dla różnych materiałów ferromagnetycznych. Zaprezentowane w pracy [15] wyniki badań pozostają w dobrej zgodności z

wynikami pochodzącymi z danych katalogowych producentów rdzeni ferromagnetycznych. Zatem opisywana metoda może stać się dobrą alternatywą dla metody klasycznej opisanej w pracy [12].

### Metoda pomiarowa z pracy [10]

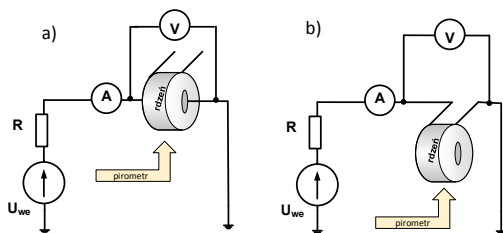
W pracy [10] przedstawiono układ pomiarowy do badania strat mocy w materiałach magnetycznych wykorzystujący półmostkową przetwornicę impulsową. Dodatkowo w cytowanej pracy opisano sposób modelowania strat mocy w materiałach magnetycznych w oparciu o uzyskane wyniki pomiarów. Jak wspomniano wcześniej, do badań wykorzystano układ przetwornicy półmostkowej pełniącej rolę generatora przebiegu prostokątnego o regulowanej wartości częstotliwości i amplitudy napięcia.

Do budowy układu wykorzystano tranzystory MOSFET w celu zapewnienia szybkiego przełączania oraz dodatkowe diody i tranzystory IGBT w celu zmniejszenia strat przełączania. W metodzie tej tranzystory MOSFET sterowane są komplementarnie ze stałym współczynnikiem wypełnienia wynoszącym 50%, który pozwala na uzyskanie symetrycznego przebiegu napięcia prostokątnego odpowiadającego symetrycznemu trójkątnemu przebiegowi indukcji magnetycznej. Obciążenie przetwornicy półmostkowej stanowi uzwojenie pierwotne transformatora zawierającego rdzeń ferromagnetyczny bez szczeliny powietrznej. W celu zmierzenia strat mocy w rdzeniu transformatora wykorzystano funkcję iloczynową wielkości rejestrowanych przez oscyloskop, tj. prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne transformatora i siły elektromotorycznej.

W pracy [10] zwrócono uwagę na konieczność prawidłowego wyświetlenia rejestrowanych na oscyloskopie przebiegów, w celu zminimalizowania błędów wynikających m.in. z przesunięcia fazowego między obserwowanymi przebiegami.

### Metoda pomiarowa z pracy [9]

W pracy [9] przedstawiono metodę pomiaru strat w materiałach magnetycznych, która jest udoskonaloną wersją metody zaproponowanej w pracy [16] i bazuje na pomiarach przejściowej impedancji termicznej. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Układ do pomiaru strat mocy w rdzeniu ferromagnetycznym przy wykorzystaniu metody opisanej w pracy [9]

W zaproponowanej metodzie pomiarowej zakłada się, że właściwości termiczne rdzenia charakteryzowane są przez rezystancję termiczną nie zależą od wartości mocy rozproszonej w rdzeniu ani od częstotliwości. Pomiar odbywa się w trzech etapach, a badanym elementem jest dławik zawierający rdzeń ferromagnetyczny. W pierwszym kroku, mierzona jest temperatura rdzenia w zależności od mocy wydzielanej w rdzeniu przy zasilaniu układu ze źródła prądu stałego (rys.3a). Temperatura rdzenia  $T_C$  jest mierzona za pomocą pirometru, a straty mocy w rdzeniu  $p_R$  są równe iloczynowi napięcia i prądu przepływającego przez rdzeń dławika. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów obliczana jest rezystancja termiczna  $R_{thR}$  rdzenia

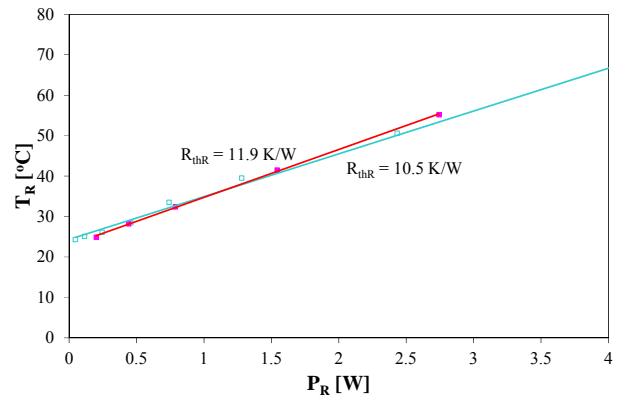
równa ilorazowi przyrostu temperatury rdzenia  $T_R$  ponad temperaturę otoczenia  $T_a$  przez moc wydzieloną w rdzeniu  $p_R$ .

W drugim kroku przez uzwojenie dławika przepływa prąd stały o regulowanej wartości. Temperatura rdzenia mierzona jest za pomocą pirometru, a także mierzone jest napięcie i prąd przepływający przez uzwojenie (rys.3b). Wzrost temperatury rdzenia w stosunku do temperatury otoczenia jest spowodowany wzajemnym oddziaływaniem termicznym między uzwojeniem a rdzeniem. Wartość prądu uzwojenia zmieniana jest w szerokim zakresie, co powoduje zmiany wartości temperatury rdzenia do kilkudziesięciu stopni Celsjusza. W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów wyznacza się wzajemną rezystancję termiczną między uzwojeniem a rdzeniem  $R_{thUR}$ , która jest równa ilorazowi przyrostu temperatury rdzenia  $T_R$  powyżej temperatury otoczenia  $T_a$  przez moc wydzielaną w uzwojeniu  $p_U$ . W trzecim kroku dławik z badanym rdzeniem został umieszczony w przetwornicy boost. Aby uzyskać jak największą wartość amplitudy indukcji magnetycznej, przetwornica powinna pracować w trybie DCM.

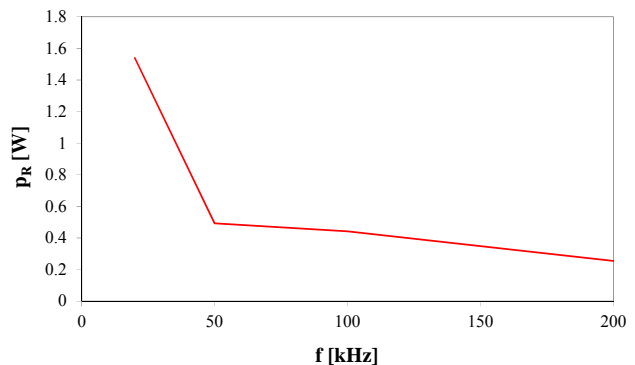
Zależność strat mocy w rdzeniu ferromagnetycznym dławika przyjmuje postać [9]:

$$(8) \quad p_R = \frac{T_R - T_a - R_{thUR} \cdot p_U}{R_{thR}}$$

W oparciu o zaproponowaną w pracy [9] metodę pomiarową zmierzono zależność temperatury rdzenia kubkowego dławika wykonanego z materiału ferrytowego F2001 od mocy wydzielanej w tym rdzeniu (rys.4). Linia oznaczona kolorem niebieskim dotyczy rdzenia dławika, na którym nawinięto 54 zwoje drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm, natomiast linia czerwona - dławika zawierającego dwa zwoje tego samego drutu.



Rys. 4. Zależność temperatury rdzenia dławika od gęstości mocy w nim wydzielanej



Rys. 5. Zależność mocy wydzielanej w dławiku od częstotliwości

Jak można zauważyć rozważana zależność dla obu dławików jest prawie liniowa co dowodzi, że rezystancja termiczna nie zależy od mocy wydzielanej w rdzeniu.

Z kolei, na rysunku 5 przedstawiono zależność mocy wydzielanej w rdzeniu od częstotliwości rozważanego dławika pracującego w przetwornicy boost.

Widać, że moc wydzielana w rdzeniu dławika maleje ze wzrostem częstotliwości uzyskując wartość ponad trzykrotnie mniejszą przy zwiększeniu częstotliwości z 50 kHz na 200 kHz.

### Podsumowanie

W pracy przeanalizowano wybrane literaturowe metody pomiaru strat mocy w materiałach magnetycznych. Większość proponowanych metod dedykowana jest do pomiaru strat mocy w rdzeniach ferromagnetycznych wykonanych z blach laminowanych lub nieuwzględniających innego niż sinusoidalny przebieg indukcji magnetycznej.

Jak wynika z przeprowadzonego przeglądu literaturowych metod pomiaru strat mocy w materiałach ferromagnetycznych, wadą opisanych metod pomiarowych są ograniczenia związane z rozmiarem badanej próbki i jej masą, niski zakres częstotliwości i wartości amplitudy indukcji magnetycznej, błąd pomiaru wynikający m.in. z przesunięcia fazowego między obserwowanymi przebiegami, czy mogące pojawić się problemy numeryczne wynikające z faktu, że większość rozważanych metod to metody pośrednie.

Dodatkowo, jak wspomniano we Wprowadzeniu, straty mocy w materiałach ferromagnetycznych są złożone i dzielą się na histerezowe, pozostałościowe i wiroprądowe, natomiast proponowane w literaturze metody często nie pozwalają na określenie poszczególnych składników tych strat i wskazać, który z nich jest dominujący. Z przeprowadzonej analizy wynika, że problem wyznaczania strat mocy w materiałach magnetycznych jest bardzo aktualny i cały czas trwają poszukiwania metody pomiarowej uwzględniającej zarówno wysoką częstotliwość, jak i trójkątny kształt czasowego przebiegu indukcji magnetycznej i cechującej się małym błędem pomiaru.

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

### LITERATURA

- [1] R. Barlik, M. Nowak.: *Energoelektronika - elementy, podzespoły, układy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2014.
- [2] M.K.Kazimierczuk.: *High-frequency magnetic components*. John Wiley & Sons, 2014.
- [3] R. Ericson, D. Maksimovic: *Fundamentals of Power Electronics*. Norwell, Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [4] A Van den Bossche., V.C Valchev.: *Inductors and transformers for power electronics*. CRC Press, Taylor & Francis Group Boca Raton, 2005.
- [5] K. Detka, K. Górecki.: *Modelling the power losses in the ferromagnetic materials*, *Material Science Poland*, 2017, Vol.35, No.2, pp.398-404.
- [6] S. Tumański.: *Handbook of magnetic measurements*, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2011.
- [7] K. Detka, K. Górecki.: *Modelling power losses in an inductor contained in the boost converter*, 12th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Doha, QATAR, 2018, doi: 10.1109/CPE.2018.8372564.
- [8] K. Górecki, K. Detka.: *Application of average electrothermal models in the SPICE-aided analysis of boost converters*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 4, 2019, pp. 2746-2755.
- [9] K. Górecki, K. Detka: *Investigations of the influence of frequency on power losses in ferrite cores*, *Journal of Physics Conference Series*, Vol.1033, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1033/1/012004.
- [10] A. Van den Bossche, V.C. Valchev, D. M. Van den Sype, L.P. Van den Bossche.: *Ferrite losses of cores with square wave voltage and dc bias*, *Journal of Applied Physics* No. 99, 2006, pp. 08M908-1 - 08M908-3.
- [11] *Soft ferrites and accessories, data handbook*, 2013 <https://www.ferroxcube.com/en-global/download/download/11>
- [12] Norma IEC 60404-2:1996, *Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame*, <https://webstore.iec.ch/publication/2063>
- [13] R. Gozdur, A. Majocho.: *Power losses measurements of nanocrystalline and amorphous magnetic cores*, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 100/2013 cz.2, s.175 – 179.
- [14] M. Milutinov, N. Blaz., L. Zivanov.: *Ferrite core loss measurement issues and technique*. 18th International Symposium on Power Electronics Ee 2015, Novi sad, Serbia, 2015, s.1-4.
- [15] Y. Zang, N.Alatawneh, M.C. Chemg.: *Magnetic core losses measurement instrumentations and dynamic hysteresis loss model*, *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, 2009, doi: 10.1109/EPEC.2009.5420918.
- [16] R. Barlik, M. Nowak, P. Grzejszczak, M. Zdanowski: *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.