

Roman GOZDUR, Andrzej MAJOCHA, Jacek GOŁĘBIEWSKI

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, KATEDRA PRZYRZĄDÓW PÓLPRZEWODNIKOWYCH I OPTOELEKTRONICZNYCH,  
ul. Wólczarska 211/215, 90-924 Łódź

## Pomiary mocy strat w niskostratnych rdzeniach nanokrystalicznych

Dr inż. Roman GOZDUR

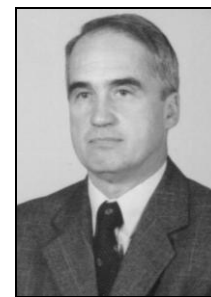
Jest adiunktem na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Łódzkiej. Stopień magistra informatyki stosowanej otrzymał w 2000 roku oraz stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika w 2004 roku na Politechnice Łódzkiej. Realizuje prace z zakresu technik DSP, projektowania, programowania i integracji komputerowych systemów pomiarowych oraz badania materiałów magnetycznych i półprzewodnikowych



e-mail: gozdur@p.lodz.pl

Dr hab. inż. Jacek GOŁĘBIEWSKI

Jest profesorem nadzwyczajnym na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Łódzkiej. Stopień doktora nauk technicznych otrzymał w 1982 roku oraz stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie elektrotechnika w 2002 roku na Politechnice Łódzkiej. Realizuje prace z zakresu modelowania mikroczujników krzemowych (MEMS, MOEMS) oraz projektowania systemów pomiarowych, bezprzewodowych systemów pomiarowych i sieci czujników.



e-mail: jacekgol@p.lodz.pl

Dr inż. Andrzej MAJOCHA

Stopień magistra w specjalności automatyka i metrologia otrzymał w 1978 roku oraz stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie metrologia w 1987 roku na Politechnice Łódzkiej. Od 2009 roku pracuje w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych Politechniki Łódzkiej. Realizuje prace z zakresu projektowania i konstruowania aparatury pomiarowej, projektowania i integracji systemów transmisji radiowej oraz badania materiałów magnetycznych i półprzewodnikowych.



e-mail: amajocha@p.lodz.pl

### Streszczenie

Referat dotyczy problemu pomiarów małych mocy przy współczynniku mocy znacznie poniżej 0,1. Problem taki ma miejsce przy określaniu stratności niskostratnych lub małowabarytowych magnetowodów. W referacie przedstawiona została aplikacja definicyjnej metody pomiaru mocy strat oraz wyniki pomiarów dla rdzeni wykonanych z taśmy nanokrystalicznej. Wyniki pomiarów uzyskane zostały metodą planimetrowania pola powierzchni pętli histerezy. W dyskusji nad wynikami uwzględniona została analiza metrologiczna zastosowanej metody, analiza źródeł błędów wyniku pomiaru.

**Słowa kluczowe:** pomiar stratności, pomiar małych mocy, pętla histerezy magnetycznej, planimetrowanie powierzchni pętli histerezy.

### Measurements of power losses in low loss nanocrystalline cores

#### Abstract

The paper concerns the problem of low power measurements at the power factor significantly less than 0.1. Such a problem occurs in determining the power loss of nanocrystalline or low-dimensioned cores. The paper presents application of the definitional method of measuring the power loss and measurement results for cores made of a nanocrystalline ribbon. The presented measurement results, graphs, and data were obtained from a measuring system developed by the authors. The paper contains the system description and specification of its technical parameters. The measurement results were obtained by defining the area of the magnetic hysteresis loop. The measurements were taken in the frequency range from 0.001 Hz up to 50 Hz. Calculations of the error are given for two significant values of the frequency. In the discussion of the results there were taken into account: metrological analysis of the method, analysis of uncertainty sources in the measurement result and comparison of the method with modern methods for measuring low power values.

**Keywords:** power loss measurement, measurement of low power, magnetic hysteresis loop, hysteresis loop area.

### 1. Wstęp

Stale rosnące koszty energii oraz gwałtownie rozwijający się rynek układów do pozyskiwania energii rozproszonej stawia oczekiwania związane z usprawnianiem urządzeń transformujących

energię. Dalsze zwiększanie sprawności urządzeń nawet na poziomie powyżej 98% jest wciąż możliwe i opłacalne [11]. Intensywne badania nad materiałami niskostratnymi o strukturze amorficznej i nanokrystalicznej oraz rozwój technologii ich wytwarzania i obróbki w ostatnim dziesięcioleciu daje nowe możliwości poprawy sprawności poprzez zmniejszenie stratności rdzeni [5, 7, 8]. Obecnie materiały niskostratne są już powszechnie wykorzystywane do produkcji małowabarytowych rdzeni stosowanych w elektronice i energoelektronice. Ponadto coraz częściej budowane są prototypowe rdzenie energetyczne [5, 7]. Równolegle udoskonalane są metody prefabrykacji rdzeni z blachy elektrotechnicznej co pozwoliło w ostatniej dekadzie zmniejszyć stratność konwencjonalnych rozwiązań o połowę [3]. Wszystkie wspomniane kierunki dalszego zwiększania sprawności poprzez zmniejszenie stratności napotykają barierę dokładnego pomiaru bardzo małych mocy strat na poziomie kilku miliwatów oraz dokładnych metod pomiaru stratności gotowych magnetowodów [1, 2, 9, 10].

W przypadku dużych i masywnych magnetowodów parametr stratności jest fundamentalnym wskaźnikiem jakości całego urządzenia i decyduje o wartości rynkowej tego urządzenia. Dla małowabarytowych rdzeni i komponentów magnetycznych licznie montowanych w urządzeniach energoelektronicznych i pomiarowych pojawia się nieco inny problem związany z eksperymentalnym określeniem stratności ze względu na małe wartości mocy rozpraszanej i trudności pomiarowe z tym związane [1, 10, 14]. Problem eksperymentalnego określenia stratności dla gotowych komponentów jest jeszcze większy jeżeli wykonane są z niskostratnych taśm amorficznych lub nanokrystalicznych i mają jednocześnie małą masę.

W tym kontekście przedstawiona została aplikacja definicyjnej metody pomiaru strat mocy, polegająca na numerycznym planimetrowaniu pola powierzchni wyznaczonej eksperymentalnie pętli histerezy magnetycznej magnetowodu.

### 2. Pomiar stratności magnetowodów

Problem pomiaru małych mocy przy bardzo małym współczynniku mocy podczas wyznaczania stratności magnetowodów wynika z następujących faktów:

- straty mocy czynnej w magnetowodach niskostratnych mogą być porównywalne ze stratami mocy w uzwojeniach magnesujących te rdzenie,
- pomiary magnetyczne, w tym pomiary stratności metodami elektrycznymi i nieelektrycznymi są znacznie mniej dokładne i trudniejsze do przeprowadzenia niż inne pomiary,
- dotychczasowe normatywne i laboratoryjne techniki pomiarowe oraz aparatura są niewystarczające lub też nie uwzględniają w dużej mierze specyfiki niskostratnych materiałów nanokrystalicznych,

- ograniczona możliwość zapewnienia komparatywności i wzajemnej weryfikacji wyników pomiarów stratności różnymi metodami pomiarowymi jest dość ograniczona.

Obecnie do pomiaru mocy strat i określania stratności rdzeni stosuje się trzy zasadnicze metody pomiarowe:

- metodę techniczną, watomierzową zalecaną w aktualnych normach [12],
- metodę definicyjną polegającą na planimetrowaniu pola powierzchni pętli histerezy magnetycznej [1, 4, 6],
- metodę kalorymetryczną wykorzystującą efekt nagrzewania się magnetowodu w wyniku zamiany w ciepło mocy czynnej traconej podczas przemagnesowywania polem zmiennym [1].

Metoda watomierzowa oraz metoda kalorymetryczna uwzględniają bezpośrednio w wyniku pomiaru moc traconą w uzwojeniu magnesującym. Uwzględnienie i eliminowanie udziału tej mocy z wyniku wymaga dodatkowego pomiaru. W przypadku pomiaru pośredniego poprzez określenie wartości rezystancji uzwojenia i prądu magnesującego pojawia się problem pomiaru małych rezystancji oraz zmieniają się warunki pomiaru.

Metoda pomiaru stratności magnetowodu poprzez planimetrowanie pola powierzchni pętli histerezy magnetycznej w naturalny sposób pozbawiona jest wcześniej opisywanej niedogodności. Powierzchnia pętli histerezy reprezentuje wszystkie składowe strat mocy związane wyłącznie z samym magnetowodem. Wyznaczenie mocy strat metodą definicyjną jest złożone technicznie i metrologicznie. Algorytm pomiarowy zmierzający do wyznaczenia stratności tą metodą uwzględnia pomiary dynamiczne, całkowanie numeryczne oraz pomiary pośrednie natężenia pola oraz indukcji magnetycznej. Uzyskanie dużej powtarzalności i dokładności pomiaru w przypadku zastosowania tej metody nakłada duże wymagania w odniesieniu do aparatury i algorytmu obliczeniowego.

Mając to na uwadze, autorzy opracowali i wykonali system pomiarowy umożliwiający pomiary mocy strat w magnetowodach w szerokim zakresie częstotliwości w zakresie od  $10^{-3}$  Hz do  $10^2$  Hz. W kolejnym rozdziałach zaprezentowane zostały przykładowe przebiegi zmian parametrów dyssypacyjnych magnetowodów w różnych warunkach magnesowania potwierdzające użyteczność metody oraz zdolność metrologiczną opracowanego systemu pomiarowego.

### 3. System pomiarowy

Badania określające właściwości magnetyczne i dyssypacyjne niskostratnych taśm nanokrystalicznych zmierzone zostały w wykonanym przez autorów i zaprezentowanym na rysunku 1 systemie pomiarowym, który jest zorientowany metrologicznie do badań w zakresie bardzo niskich częstotliwości pola magnesującego.



Rys. 1. System pomiarowy do badania materiałów magnetycznych  
Fig. 1. Measurement system for testing soft magnetic materials

Ze względu na właściwości metrologiczne, system umożliwia badanie materiałów o stratnościach znacznie poniżej 1 W/kg z możliwością pomiaru mocy strat na poziomie 0,1 mW.

Podstawowe właściwości systemu są następujące:

- próbki pomiarowe o masie do 2 kg w aparatach probierczych Epsteina, pierścieniowych i jarzmowych,
  - zakres częstotliwości pola magnesującego regulowany programowo od 100 Hz w dół do wartości 0,001 Hz,
  - programowany kształt przebiegu pola magnesującego.
  - pomiar natężenia pola magnetycznego, indukcji magnetyzacji, polaryzacji, przenikalności,
  - wyznaczanie krzywych pętli histerezy magnetycznej, krzywej magnesowania, krzywych przenikalności,
  - obliczanie stratności, strat histerezowych, strat całkowitych, rozdział strat na składowe, wyznaczanie krzywych strat w funkcji częstotliwości i indukcji,
  - wszystkie funkcje systemu realizowane i sterowane z poziomu programu sterującego systemem pomiarowym z możliwością programowania makropoleceń dla procedur pomiarowych,
  - wydruk raportów pomiarowych, eksport wyników do plików w formatach \*.xls, \*.txt, \*.bmp.
- Podstawowe parametry metrologiczne systemu:
- zakres pomiarowy natężenia pola 20 kA/m
  - zakres pomiarowy indukcji 2,2 T
  - zakres częstotliwości pola (0,001–100) Hz
  - najmniejsza mierzalna moc strat na poziomie 0,1 mW
  - pomiar stratności metodami normatywnymi, definicyjnymi i metodą mostkową [14].

Graniczne błędy instrumentalne są określane dla każdego eksperymentu pomiarowego indywidualnie, w zależności od konfiguracji układu pomiarowego, warunków przemagnesowania t.j. indukcji magnetycznej, natężenia pola, częstotliwości oraz rodzaju, wymiarów i masy materiału magnetycznego.

### 4. Wyniki pomiarów

Prezentowane wyniki pomiarów dotyczą rdzenia toroidalnego wykonanego z taśmy nanokrystalicznej Vitroperm 500F o średniej długości obwodu magnetycznego 361 mm i masie 757 g. W tabeli 2 zestawione zostały najważniejsze warunki techniczne pomiaru i parametry metrologiczne systemu pomiarowego. Na rysunkach 2 i 3 pokazane zostały przebiegi zmian stratności w funkcji częstotliwości. Wyniki zaprezentowane zostały w dwóch wariantach (skala liniowa i logarytmiczna) w celu wyeksponowania znacznie innego charakteru zmian stratności w funkcji częstotliwości niż ma to miejsce w przypadku blach elektrotechnicznych. Wyniki pomiarów wskazują, że przebieg zmian stratności w funkcji częstotliwości nie jest zgodny z przebiegiem funkcji potęgowej jak to ma miejsce w przypadku blach elektrotechnicznych. Ponadto ekstrapolacja stratności w kierunku warunków statycznych (częstotliwość przemagnesowania dążąca do zera) jest również odmienna. Na rysunku 2 wyraźnie widać, że poniżej częstotliwości 10 Hz wartość stratności energii stabilizuje się, co oznacza że warunki przemagnesowania osiągają charakter quasi-statyczny. W takich warunkach straty energii reprezentują składową histerezową strat, a powierzchnia pętli histerezy osiąga wartość minimalną, co zostało zaprezentowane na rysunku 4.

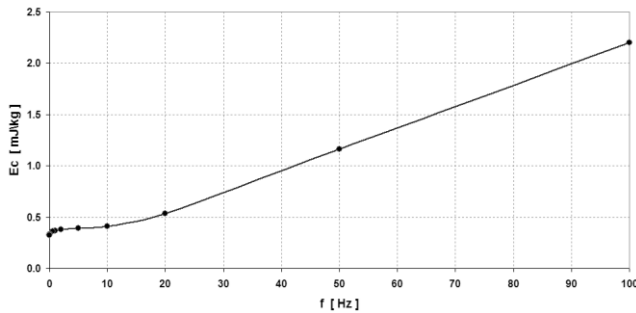
Tab. 1. Wartości strat histerezowych mocy w jednym cyklu określone analitycznie  $E_{h50,1}$ ,  $E_{h50,0,001}$  oraz eksperymentalnie  $E_h$

Tab. 1. Calculated  $E_{h50,1}$ ,  $E_{h50,0,001}$  and measured  $E_h$  values of power losses per cycle

$E_{h50,1}$	$E_{h50,0,001}$	$E_h$
[ mJ/kg ]	[ mJ/kg ]	[ mJ/kg ]
0,36	0,33	0,33

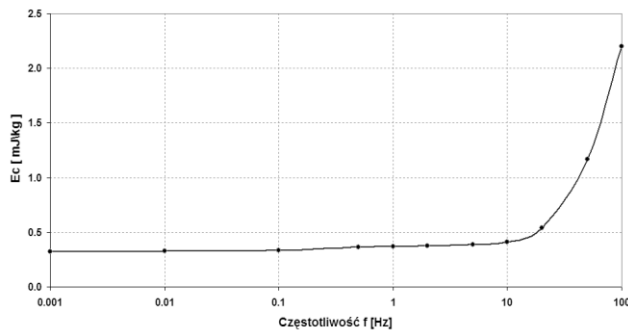
Wartości strat histerezowych mocy przypadających na jeden cykl przemagnesowania określono analitycznie w oparciu o ekstrapolację liniową strat wyznaczonych w dwóch różnych często-

tlivościach [4]. W tabeli zestawiono wyniki strat histerezowych mocy w jednym cyklu  $E_{h50/1}$ ,  $E_{h50/0,001}$ , wyznaczonych na podstawie pomiarów w częstotliwościach 0,001 Hz, 1 Hz, 50 Hz. Straty histerezowe  $E_h$  określone zostały eksperymentalnie w częstotliwości 0,001 Hz.



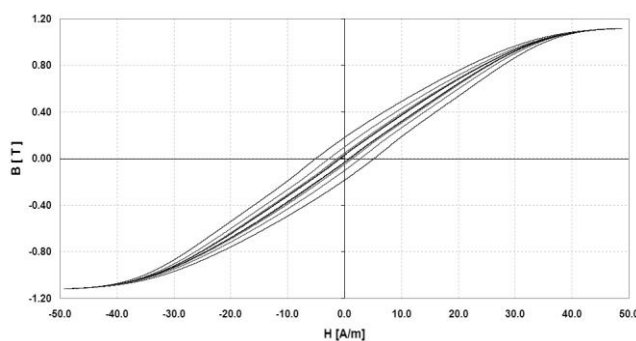
Rys. 2. Wykres strat energii w funkcji częstotliwości  $B_m=1,1$  T;  $f=(0,001\div 100,0)$  Hz próbka toroidalna ( $130\times 100\times 25$ ) mm; taśma nanokrystaliczna VITROPERM 500F (VAC)

Fig. 2. Energy losses vs. frequency;  $B_m=1,1$  T;  $f=(0,001\div 100,0)$  Hz toroidal core  $130\times 100\times 25$  mm; nanocrystalline ribbon VITROPERM 500F(VAC)



Rys. 3. Wykres strat energii w funkcji częstotliwości  $\log(f)$ ;  $B_m=1,1$  T;  $f=(0,001\div 100,0)$  Hz

Fig. 3. Energy losses vs. frequency (logarithmic graph);  $B_m=1,1$  T;  $f=(0,001\div 100,0)$  Hz

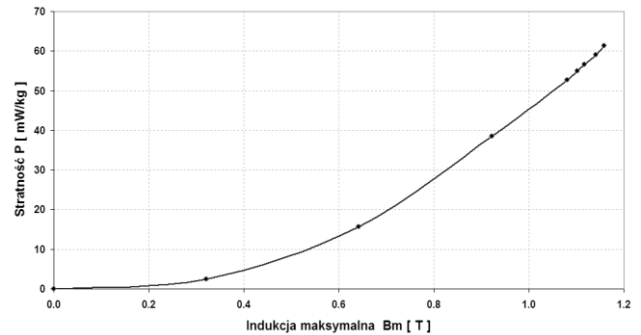


Rys. 4. Pętle histerezy dla  $B_m=1,1$  T,  $f=(0,001\div 100,0)$  Hz

Fig. 4. Hysteresis loops at  $B_m=1,1$  T,  $f=(0,001\div 100,0)$  Hz

W celu pełnego zobrazowania parametrów dyssypacyjnych magnetowodu wykonanego z taśmy nanokrystalicznej na rysunku 5 pokazany został przebieg zmienności stratności magnetowodu w funkcji indukcji maksymalnej. Również w tym przypadku przebieg zmienności jest inny niż to mam miejsce w rdzeniach z blachy elektrotechnicznej, przez co należy użyć innych funkcji aproksymujących oraz funkcji ekstrapolujących stratność.

Stratność wagowa materiału Vitroperm 500F określona eksperymentalnie przy częstotliwości 50 Hz i indukcji maksymalnej równej 1,1 T wynosi 0,065 W/kg. Inne materiały magnetyczne o strukturze nanokrystalicznej charakteryzują się stratnością w zakresie  $(0,02\div 0,1)$  W/kg [16, 17].



Rys. 5. Wykres stratności w funkcji indukcji maksymalnej przy częstotliwości 50 Hz

Fig. 5. Power losses vs. maximum induction at frequency 50 Hz

## 5. Analiza metrologiczna

Zgodnie z równaniem pomiaru (1), aby wyznaczyć wartość stratności magnetowodu  $P_s$ , należy wykonać pomiar natężenia pola, indukcji magnetycznej, częstotliwości oraz określić gęstość materiału magnetycznego i pole powierzchni pętli histerezy.

$$P_s = \frac{f}{\rho} \oint_B H dB = \frac{f}{\rho} \oint_H B dH \quad (1)$$

gdzie:  $P_s$  – stratność materiału magnetycznego,  $f$  – częstotliwość pola,  $\rho$  – gęstość materiału magnetycznego,  $B$  – indukcja magnetyczna,  $H$  – natężenie pola magnetycznego.

Sygnały pomiarowe indukcji (2) i natężenia pola (3) uzyskuje się metodą pośrednią z zastosowaniem czujnika indukcyjnego z integratorem (pomiar  $B$ ) oraz bocznika (pomiar  $H$ ).

$$B(t) = \frac{T_i}{N_2 \cdot A} U_{INT}(t) \quad (2)$$

gdzie:  $T_i$  – stała całkowania integratora,  $N_2$  – liczba zwojów uzwojenia pomiarowego,  $A$  – pole powierzchni poprzecznej magnetowodu,  $U_{int}(t)$  – wartość chwilowa napięcia wyjściowego integratora.

$$H(t) = \frac{N_1}{l_{sr}} I_H(t) = \frac{N_1}{l_{sr} \cdot R_H} U_H(t) \quad (3)$$

gdzie:  $N_1$  – liczba zwojów uzwojenia magnesującego,  $l_{sr}$  – średnia długość obwodu magnetycznego,  $R_H$  – rezystancja bocznika w obwodzie magnesującym,  $U_H(t)$  – wartość chwilowa spadku napięcia na boczniku  $R_H$ .

Podstawiając wyrażenia (2) i (3) do wzoru (1), po przeprowadzeniu przekształceń i zmianie granic całkowania, otrzymuje się wyrażenie na stratność (4):

$$P_s = \frac{T_i \cdot f \cdot N_1}{m \cdot R_H \cdot N_2} \int_{u_H} u_{INT} du_H \quad (4)$$

gdzie:  $m$  – masa próbki materiału magnetycznego, pozostałe oznaczenia jak we wzorach (2) i (3).

Wyrażenie (4) zawiera wielkości, które mają wpływ na dokładność wyznaczenia stratności materiału magnetycznego. Są to: stała czasowa integratora  $T_i$ , częstotliwość pola  $f$ , masa materiału magnetycznego  $m$ , rezystancja bocznika  $R_H$ , liczba zwojów uzwojenia magnesującego  $N_1$  i pomiarowego  $N_2$  oraz napięcie wyjściowe integratora  $u_{INT}$  w kanale pomiaru indukcji i spadek napięcia  $u_H$  w kanale pomiaru natężenia pola.

W wyrażeniu (4) na stratność nie występują parametry geometryczne próbki ( $l_{sr}$ ,  $A$ ) oraz gęstość  $\rho$ , które zostały wyrugowane po przekształceniach. Jest to korzystne, bo została zmniejszona liczba argumentów funkcji pomiaru, szczególnie o parametry stosunkowo trudne do wyznaczenia, takie jak średnia długość drogi magnetycznej (np. w aparacie Epsteina) oraz gęstość materiału magnetycznego. Poprawność przekształceń jest oparta na założeniach że:

- obwód magnetyczny jest jednorodny w całej objętości, na całej długości drogi magnetycznej,
- zapewnione jest jednorodne magnesowanie w całym magneto-  
wodzie w taki sposób aby rozkład składowej stycznej natężenia pola na całej długości drogi magnetycznej był jednorodny,
- mierzone napięcie indukowane jest w uzwojeniu pomiarowym przez strumień magnetyczny przenikający powierzchnię przekroju dokładnie poprzecznego,
- uzwojenie pomiarowe nie jest obciążone,
- warunki początkowe namagnesowania oraz samo przemagnesowanie magnetowodu odbywa się w taki sposób, że zachodzi pełna symetria przebiegu histerezy w cyklu przemagnesowania, w którym następuje właściwy pomiar.

Na podstawie wyrażenia (4) można napisać wzór na błąd graniczny wyznaczania stratności o postaci (5):

$$\delta_{gR} = \delta_{gT_i} + \delta_{gT} + \delta_{gm} + \delta_{gR_H} + \delta_{gN_1} + \delta_{gN_2} + \delta_{gS} \quad (5)$$

gdzie:  $\delta_{gxx}$  – błędy względne odpowiednich wielkości,  $\delta_{gS}$  – błąd względny wyznaczenia pola powierzchni pętli histerezy magnetycznej we współrzędnych ( $u_H$ ,  $u_{INT}$ ).

Dokładne wykonanie uzwojeń próbki pozwala wyeliminować składowe  $\delta_{gN_1}$  oraz  $\delta_{gN_2}$  błędu granicznego. Kolejne składowe błędy oznaczone  $\delta_{gf}$ ,  $\delta_m$ ,  $\delta_{gRH}$  przyjmują wartości wynikające bezpośrednio z właściwości metrologicznych zastosowanych przyrządów pomiarowych i wynoszą odpowiednio:  $10^{-6}$ ,  $10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-4}$ . Błąd względny stałej czasowej integratora  $\delta_{gT_i}$  został wyznaczony w układzie multiwibratora i wynosi 0,017% [13], a błąd  $\delta_{gS}$  można wyrazić zależnością (6) [15].

$$\delta_{gS} = \sqrt{\left(\frac{2u_{INTm} \Delta_{guH}}{S}\right)^2 + \left(\frac{2u_{Hm} \Delta_{guINTm}}{S}\right)^2} + \delta_{numS}^2 \quad (6)$$

gdzie:  $u_{INTm}$ ,  $u_{Hm}$  - wartości maksymalne napięć w kanałach pomiaru  $B$  i  $H$ ,  $\Delta_{guH}$ ,  $\Delta_{guINT}$  - graniczne błędy bezwzględne pomiaru napięć  $u_H$ ,  $u_{INT}$ ,  $S$  - pole powierzchni pętli histerezy we współrzędnych ( $u_H$ ,  $u_{INT}$ ),  $\delta_{numS}$  - błąd względny numerycznego wyznaczenia powierzchni pętli histerezy.

Tab. 2. Wartości błędów wyznaczania strat mocy

Tab. 2. Error values of power loss calculations

material	Vitroperm 500F	
$f$ [Hz]	50,0	1,0
$B_m$ [T]	1,10	
$H_m$ [A/m]	48,0	
$m$ [kg]	0,757	
$S$ [J/m <sup>3</sup> ]	8,91	2,70
$P_s$ [W/kg]	$58,3 \cdot 10^{-3}$	$0,367 \cdot 10^{-3}$
$\delta_g U_H$	0,111%	
$\delta_g U_{INT}$	0,051%	
$\delta_g T_i$	0,017%	
$\delta_{gf}$	$1 \cdot 10^{-6}$ %	
$\delta_m$	0,01%	
$\delta_{gR_H}$	0,03%	
$\delta_{numS}$	1,8%	
$\delta_g S$	4,08%	12,1%
$\delta_g P_s$	4,3%	12,4%

Wyznaczona wartość błędu  $\delta_{numS}$  wynosi 1,8% [13, 15], natomiast wartości pozostałych składników błędu  $\delta_{gS}$  wynikają bezpośrednio z właściwości metrologicznych karty pomiarowej oraz wartości wyniku numerycznego planimetrowania pętli histerezy.

## 6. Podsumowanie

Prezentowany system pomiarowy stanowi współczesną, bardzo użyteczną aplikację definicyjnej metody pomiaru strat mocy w magnetowodach. Ze względu na fakt, że zastosowana w systemie pomiarowym metoda definicyjna jest inna niż zalecana w normach, prezentowany system stanowi cenne narzędzie badawcze dostarczające dane dla celów porównawczych i weryfikacyjnych.

System pomiarowy wykonany w ramach projektu badawczego 3T10 C051 29 finansowanego przez MNiSW.

## 7. Literatura

- [1] Fiorillo F.: Characterization and Measurement of Magnetic Materials, Elsevier Books 2004.
- [2] Tumański S.: Technika pomiarowa, WNT, Warszawa 2007.
- [3] Wilezyński W.: Wpływ technologii na właściwości magnetyczne rdzeni maszyn elektrycznych. Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 215, Warszawa 2003.
- [4] Nałęcz M., Jaworski J.: Miernictwo magnetyczne, Warszawa, WNT 1968.
- [5] Okazaki Y.: Loss deterioration in amorphous cores for distribution transformers, J.Magn. Magn. Mater. vol. 160 s. 217-222, Elsevier 1996.
- [6] Gozdur R., Majocha A.: Kryterium klasyfikacji quasi-statycznych pętli histerezy magnetycznej. VIII Sympozjum Pomiarów Magnetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, Mies., 1/2007, Warszawa, Wydawnictwo Sigma, 2007.
- [7] Piccina R., Tiberto P., Chiriack H., Baricco M.: Magnetic properties and power losses in Fe-Co-based bulk metallic glasses. JMMM. vol. 320 s. 806-809, Elsevier 2008.
- [8] Soński M.: Materiały Magnetyczne w Technice. Warszawa, COSiW SEP, 2001.
- [9] Sievert J.: Badania właściwości magnetycznych blach elektrotechnicznych. Przegląd Elektrotechniczny 5/2005.
- [10] Bajorek J., Nowak J.: Współczesne możliwości pomiaru przenikalności i stratności blach elektrotechnicznych. VI Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych, Kielce, 18-20.10.2000, s. 20-29.
- [11] Hasegawa R., Azuma D.: Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment, J.Magn. Magn. Mater. vol. 320 s. 2451-2456, Elsevier 2008.
- [12] PN-EN-2002/60404-(1 do 5) Materiały magnetyczne.
- [13] Gozdur R., Majocha A.: Analogowe i cyfrowe przetwarzanie sygnałów pochodzących z czujników indukcyjnych, Przegląd Elektrotechniczny, 4(2010) s. 52-54.
- [14] Majocha A., Gozdur R.: Mostkowa metoda pomiaru stratności materiałów magnetycznie miękkich, Przegląd Elektrotechniczny, 4(2010) s. 79-82.
- [15] Gozdur R., Majocha A.: Analiza dokładności wyznaczania parametrów materiałów magnetycznie miękkich przy bardzo niskich częstotliwościach, Przegląd Elektrotechniczny, 1(2011) s.130-133.
- [16] Makino A., Bitoh T., Kojima A., Inoue A., T. Masumoto T.: Low core losses of nanocrystalline Fe-Zr-Nb-B soft magnetic alloys with high magnetic flux density, Materials Science and Engineering vol. 254-255 s. 1083-1086, Elsevier 2001.
- [17] Hasiak M., Ciurzynska W.H., Y. Yamashiro, H. Fukunaga H.: Soft magnetic properties of amorphous and nanocrystalline Fe<sub>80</sub>Zr<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>B<sub>12</sub>Cu<sub>1</sub> alloy, Materials Science and Engineering vol. 254-255 s. 434-436, Elsevier 2003.