

Warunki pomiaru własności magnetycznych rdzeni ferromagnetycznych metoda watomierzową

Streszczenie Do najważniejszych właściwości rdzeni magnetycznych, zaliczyć należy charakterystyki magnesowania ($B_m = f(H_m)$), zmiany przenikalności względnej ($\mu_r = f(H_m)$) oraz poziom jednostkowych strat mocy ($P = f(B_m)$). Wysokie parametry użytkowe takich wyrobów jak transformatory pomiarowe stwarzają konieczność kontroli jakości ich rdzeni. W pracy przedstawiono uwarunkowania zastosowania metody watomierzowej z oscyloskopem do określania własności magnetycznych rdzeni ferromagnetycznych o masach do 30 kg.

Abstract The most important properties of magnetic cores are the magnetisation characteristics ($B_m = f(H_m)$), changes of magnetic permeability ($\mu_r = f(H_m)$) and specific total unit loss. High functional parameters of such products as measurements transformers create necessity of quality control their cores. In this paper are shown application conditions of wattmeter with oscilloscope method to determination of magnetic properties of ferromagnetic cores with mass to 30 kg. **Application conditions of wattmeter with oscilloscope method to determination of magnetic properties of ferromagnetic cores**

Słowa kluczowe: rdzenie magnetyczne, własności magnetyczne

Keywords: magnetic cores, magnetic properties

doi:10.12915/pe.2014.01.54

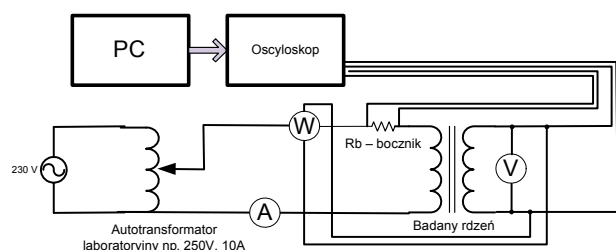
Wstęp

Wraz z powstaniem i rozwojem maszyn elektrycznych powstała konieczność określania jakości materiałów stosowanych do ich produkcji. Taśmy elektrotechniczne badane są metodami znormalizowanym takimi jak: aparat Epsteina [1] lub aparat do pomiarów na pojedynczym arkuszu blachy [2], wyposażonymi w systemy komputerowe np. [3]. Metody te pozwalają na, a przede wszystkim powtarzalny sposób określenia właściwości magnetycznych taśm elektrotechnicznych.

W przypadku rdzeni o relatywnie dużych masach, rzędu 10 i więcej kilogramów, powszechnie dostępne systemy komputerowe zazwyczaj nie zapewniają kształtowania strumienia magnetycznego. Wynika to z dużych mocy niezbędnych do przemagnesowania wymaganej wówczas ilości ferromagnetyku. Przykładowo, dla mocy wzmacniacza 2000 W i masy rdzenia ok. 25 kg osiąga się indukcję w rdzeniu rzędu 1,6 T (gdy wykonany jest z taśmy elektrotechnicznej gatunku HiB) lub tylko 1,1 T (w przypadku rdzenia z taśmy nieorientowanej).

Układy pomiarowe

Badanie właściwości materiałów magnetycznie miękkich obejmuje pomiar dwóch przebiegów czasowych: indukcji $b(t)$ i natężenia pola magnetycznego $h(t)$ określanych z zależności (2) i (3). Na podstawie przebiegów tych wielkości oblicza się następnie jednostkowe straty mocy badanego obiektu (1). Takie postępowanie wymaga stosowania systemów komputerowych, których wadą jest ograniczona do kilku kilogramów masa rdzeni. Dla większych rdzeni wykorzystuje się metodę watomierzową [4] (jak na rys. 1). W pracy przedstawiono opis tej metody, ale z wykorzystaniem oscyloskopu oraz przedstawiono przykładowe wyniki badań dla trzech rdzeni różnego typu.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego metody watomierzowej (bez kształtowania strumienia w badanym rdzeniu) z oscyloskopem

O poprawności metrologicznej układu z rys. 1) świadczy zapewnienie odpowiedniego wymuszenia, tzn. kształtu prądu magnesującego, tak aby uzyskać sinusoidalny przebieg strumienia magnetycznego w badanym rdzeniu. Wynika to z zachowania współczynnika kształtu na poziomie $\pm 1\%$ w przeważającej części zakresu pomiarowego (rys. 4).

Jednostkowe straty mocy wyznaczane są przykładowo z zależności (1):

$$(1) \quad P = \frac{1}{\gamma S_{Fe} z_2 T} \int_0^T h(t) u_B(t) dt$$

gdzie: $u_B(t)$ – napięcie indukowane po stronie wtórnej, t – czas, T – okres mierzonego przebiegu, z_2 – liczba zwojów uzwojenia magnesującego, S_{Fe} – przekrój rdzenia, γ – gęstość taśm elektrotechnicznych.

Przebieg natężenia pola magnetycznego określa się z zależności (2), z przebiegu spadku napięcia $u_H(t)$ na rezystorze R_b włączonym w obwód magnesowania rdzenia. Pomiędzy wartościami chwilowymi natężenia pola magnetycznego $h(t)$ i napięciem $u_H(t)$ istnieje – wynikająca z prawa przepływu – zależność (2):

$$(2) \quad h(t) = \frac{u_H(t) z_1}{R_b l_{sr}}$$

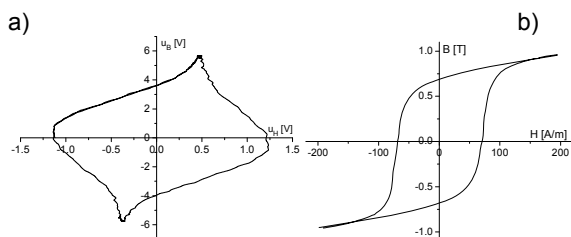
gdzie: l_{sr} – długość średniej drogi magnetycznej, z_1 – liczba zw. uzwojenia magnesującego, R_b – wartość rezystancji bocznika.

Związek pomiędzy wartością chwilową indukcji magnetycznej $b(t)$ i indukowanej siły elektromotorycznej $u_B(t)$ wynika z prawa indukcji elektromagnetycznej i opisany jest zależnością (3):

$$(3) \quad b(t) = \frac{1}{S_{Fe} z_2} \int u_B(t) dt$$

Określone na drodze pomiarowej wartości (2) i (3) pozwalają na wyznaczenie wielu wielkości charakteryzujących właściwości magnetyczne badanego

rdzenia. Za pomocą układu z rys. 1 wyznacza się takie zależności jak dynamiczną charakterystykę magnesowania $B_m = f(H_m)$ lub charakterystykę przenikalności względnej $\mu_r = f(H_m)$. Przykładowe pętle histerez dla rdzenia pakietowanego spawanego z taśmy niezorientowanej (tab. 1), przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowe pętle histerez dla indukcji magnetycznych ok. 1.0 T określone metodą watomierzową z oscyloskopem (rys. 1) dla rdzenia pakietowanego spawanego A (tab.1) we współrzędnych: a) $u_B = f(u_H)$ oraz b) $B = f(H)$ (wyniki własne)

W przypadku układu z rys. 1 wykorzystanie przebiegów czasowych z oscyloskopu cyfrowego nie jest tak oczywiste, jak to było w przypadku stosowania oscyloskopów analogowych gdzie oba kanały są przetwarzane oddzielnie i można wykonywać obliczenia jak w (1). W przypadku aktualnie stosowanych oscyloskopów cyfrowych, całkowanie jest utrudnione, a wynika to z niejednoczesności akwizycji przebiegów.

Metoda watomierzowa z oscyloskopem cyfrowym umożliwia jednak łatwiejszy pomiar rdzeni o relatywnie dużych masach, w stosunku do zazwyczaj stosowanych systemów komputerowych, z kształtowaniem przebiegu strumienia magnetycznego.

Uwarunkowania metody watomierzowej z oscyloskopem

Do badań wytypowano trzy rdzenie: dwa rdzenie pakietowane z taśmy niezorientowanej M400-50A (spawany oraz skręcany) i jeden rdzeń cięty wykonywany z taśmy zorientowanej M130-30S w technologii zwijanej z rozproszoną szczeliną powietrzną typu Unicore [5].

Tabela 1. Charakterystyka badanych rdzeni wykonanych z taśm elektrotechnicznych: zorientowanej i niezorientowanej

Rdzeń	Gatunek taśmy	Masa rdzenia	Max. wartość B_m	
			System komp. [1]	watomierzowi (rys.1)
Zwijany cięty Unicore [5]	M130-30S	15 kg	1.6 T	1.9 T
Pakietowany spawany A	M400-50A	23 kg	1.3 T	1.6 T
Pakietowany skręcany B	M400-50A	28 kg	1.2 T	1.4 T

Rdzeń zwijany z rozproszoną szczeliną powietrzną charakteryzuje się ciągłością strumienia magnetycznego, a mimo to wykonanie pomiarów system komputerowym takiego rdzenia o masie 15 kg możliwe jest tylko do wartości indukcji 1.6 T (tab. 1). Metoda watomierzowa pozwala natomiast na określenie właściwości tego wyrobu do indukcji 1.9 T. W przypadku rdzenia o masie 28 kg niemożliwym staje się wówczas osiągnięcie indukcji powyżej 1.4 T, gdyż ograniczenie posiadanego systemu pomiarowego stanowi moc autotransformatora wynosząca 2.5 kVA.

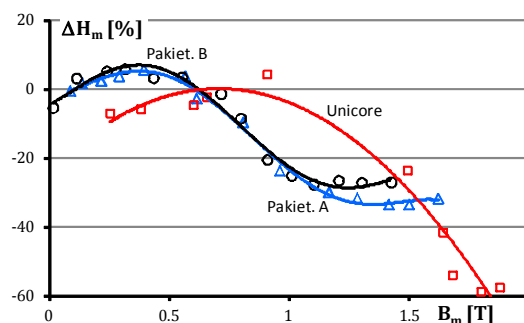
Liczyć należy się z okolicznością, że nawet dla sinusoidalnego źródła napięcia, nieliniowość charakterystyki magnesowania rdzenia ferromagnetycznego wprowadza znaczące zniekształcenia prądu magnesującego i

indukowanego po stronie wtórnej napięcia. Stwierdzono przy tym, że wzrost indukcji magnetycznej z 1.0 T do 1.5 T powoduje ponad 3-krotny wzrost współczynnika THD napięcia wtórnego [6]. Dokładność pomiaru jednostkowych strat mocy silnie zależy przy tym od kształtu strumienia magnetycznego, proporcjonalnego z kolei do napięcia wtórnego [1, 2, 4]. W metodzie watomierzowej (rys. 1) pomiar natężenia pola magnetycznego w przypadku badania relatywnie dużych rdzeni może być także obarczony znacznym błędem. Dla celów ograniczenia tego błędu zastosowano analizę przebiegów czasowych mierzonego prądu metodą oscyloskopową, a następnie określono współczynnik ΔH_m (rys. 3). Stwierdzono błąd systematyczny zaniżania wartości natężenia pola magnetycznego mierzonego z wykorzystaniem amperomierza, w stosunku do rzeczywistego przebiegu określanego oscyloskopem ($\Delta H_m < 0$). Na rys. 3 przedstawiono zaniżanie tych mierzonych wartości maksymalnych natężenia pola magnetycznego ΔH_m w funkcji indukcji B_m .

Maksymalną wartość natężenia pola magnetycznego określono z prawa przepływu, zakładając sinusoidalny charakter zmian pola magnetycznego. Zmiany wartości maksymalnej ΔH_m (rys. 3) obliczono ze wzoru:

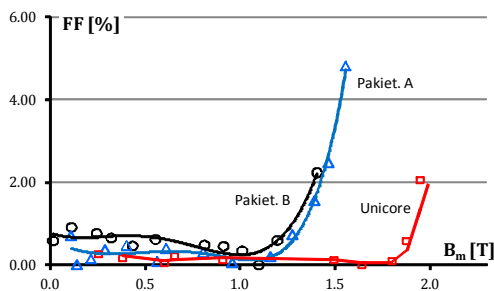
$$(4) \quad \Delta H = \frac{H_A - H_{osc}}{H_{osc}} 100\%$$

gdzie: H_A – wartość maksymalna natężenia pola magnetycznego określana z wykorzystaniem amperomierza wartości skutecznej, H_{osc} – wartość maksymalna natężenia pola magnetycznego ze wzoru (2) określana na podstawie przebiegu z oscyloskopu.



Rys. 3. Zależność zmian wartości pola magnetycznego od indukcji $\Delta H_m = f(B_m)$ dla badanych rdzeni, określana amperomierzem wartości skutecznej w relacji do m. oscyloskopowej (wyniki własne)

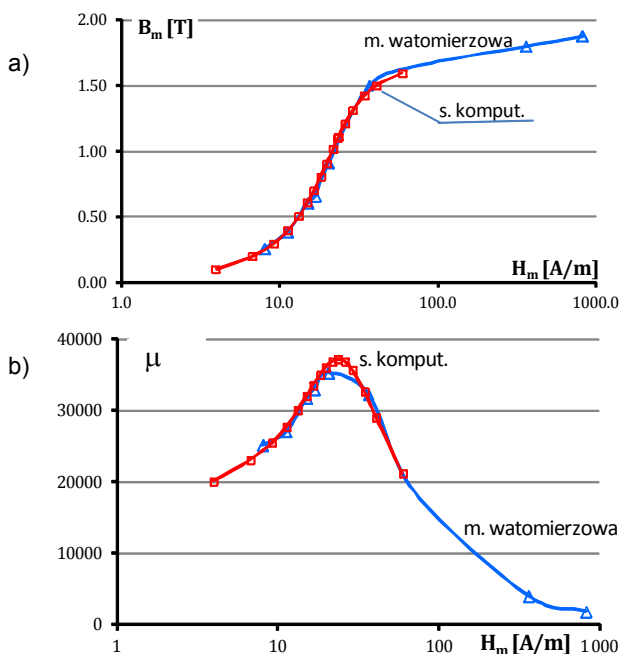
Jak to wynika z danych na rys. 3 zmiany $\Delta H_m = f(B_m)$ mają podobny charakter i zależą od rodzaju rdzenia tj. zależą od stopnia ciągłości obwodu magnetycznego. Z doświadczeń przemysłowych wynika, że własności rdzeni z rozproszoną szczeliną powietrzną (pakietowane) można mierzyć poprawnie do wartości indukcji rzędu 0.6 T ($\Delta H_m \leq \pm 10\%$), po czym zauważa się znaczny wzrost wartości błędu pomiaru. Zjawisko wzrostu tego współczynnika ΔH_m dla rdzeni zwijanych ciętych typu Unicore [5] zauważa się dopiero przy wartości indukcji dwa razy większej. Prezentowane dane obrazują w ujęciu ilościowym, jak bardzo podczas magnesowania ferromagnetyku ulega odkształceniu sinusoidalny przebieg prądu, w którym to przypadku metoda oscyloskopowa umożliwia bardziej precyzyjny pomiar własności magnetycznych rdzeni poprzez bardziej precyzyjne określenie wartości H_m .



Rys. 4. Procentowe zmiany wartości współczynnika kształtu FF [6] badanych rdzeni magnetycznych (tab. 1), w zależności od maksymalnej indukcji B_m (wyniki własne)

Zauważyć należy, że podczas magnesowania ulega odkształceniu nie tylko prąd magnesujący, ale także indukowany strumień magnetyczny i wywołane nim napięcie wtórne wzór (3). W obowiązujących normach [1, 2] zakłada się, że współczynnik kształtu strumienia magnetycznego nie powinien odbiegać od wartości 1.1107 (tj. dla sinusoidy) bardziej niż $\pm 1\%$. Jak wynika z danych na rys. 4) poprawny pomiar – z uwzględnieniem tego ograniczenia – możliwy jest dla rdzeni pakietowanych do wartości 1.2 T, a dla rdzeni z rozproszoną szczeliną powietrzną - do niemal 1.9 T.

Prezentowane na rys. 4 zmiany współczynnika kształtu FF korespondują z charakterem zmian współczynnika zawartości harmonicznych THD badanych rdzeni [7]. Wzrost współczynnika THD przekłada się z kolei na wzrost strat od wyższych harmonicznych w stratach całkowitych, co w omawianym przypadku oznacza mniejsze straty rdzeni o bardziej ciągłym obwodzie magnetycznym, tj. o nieznacznie rozproszonej szczelinie powietrznej (rdzeń typu Unicore [5]).



Rys. 5. Własności rdzenia magnetycznego typu Unicore z wykorzystaniem systemu komputerowego oraz metody watomierzowej z oscyloskopem: a) charakterystyka magnesowania $B_m = f(H_m)$, b) zmiany przenikalności względnej $\mu_r = f(H_m)$

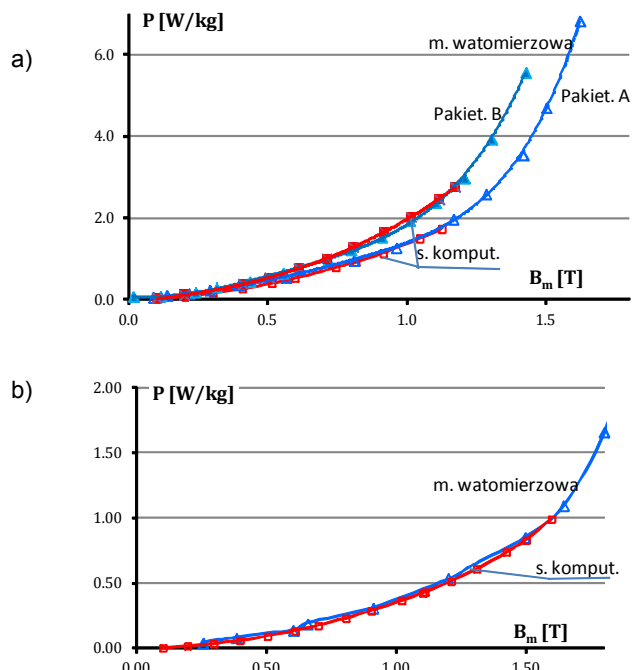
Wyniki badań

Zakresem badań objęto rdzenie (tab. 1): pakietowane spawane A i skręcane B [7] oraz zwijane cięte z

rozproszoną szczeliną powietrzną typu Unicore [5]. Badano po trzy sztuki każdego typu rdzenia, jak w tab. 1. W rdzeniach Unicore [5] zauważalne są charakterystyczne przesunięcie geometrycznie szczeliny powietrznej w rdzeniu, zapewniające lepszą ciągłość strumienia magnetycznego aniżeli w przypadku rdzeni pakietowanych.

Na rys. 5 przedstawiono charakterystykę magnesowania oraz zmian przenikalności względnej $\mu_r = f(H_m)$ rdzenia typu Unicore [5] i tab. 1) określone systemem komputerowym [1] i metodą watomierzową z oscyloskopem (rys. 1).

Z danych na rys. 5 wynika duża zgodność uzyskanych wyników pomiarowych, przy czym metoda watomierzowa z oscyloskopem umożliwia znaczne rozszerzenie zakresu pomiarowego. Wykorzystując tę zaletę na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów jednostkowych strat mocy badanych rdzeni, do wartości powyżej 1.5 T.



Rys. 6. Porównanie charakterystyk stratności $P = f(B_m)$ zmierzonych za pomocą systemu komputerowego i metodą watomierzową z oscyloskopem (rys. 1) dla rdzeni a) pakietowanego spawanego A i pakietowanego skręcane B (tab. 1) z nieorientowanej taśmy elektrotechnicznej, b) zwijanego z rozproszoną szczeliną powietrzną typu Unicore z taśmą zorientowanej (wyniki własne)

Prezentowane dane na rys. 6 potwierdzają większą przydatność metody watomierzowej z oscyloskopem dla celów pomiarów relatywnie dużych rdzeni magnetycznych. Określenie stratności możliwe jest dla takich rdzeni do wartości 1.4 i 1.6 T (odpowiednio rdzeń skręcany i spawany) i do 1.9 T dla rdzenia zwijanego z rozproszoną szczeliną powietrzną (rys. 6b).

Nieznaczne różnice charakterystyk stratności przedstawione na rys. 6 wynikają ze sposobu wykonywania pomiarów. System komputerowy wyposażony jest w pętlę sprzężenia zwrotnego umożliwiającą kształtowanie strumienia magnetycznego w rdzeniu, zapewniając jego sinusoidalny charakter - zgodnie z wymaganiami normy [1]. Metoda watomierzowa z oscyloskopem jest prostsza, lecz pozbawiona jest tej zalety. W metodzie tej prąd magnesujący płynie bezpośrednio z sieci, poprzez autotransformator - nie ma zatem możliwości wpływania na kształt indukowanego strumienia magnetycznego w rdzeniu. Stąd też liczyć się należy z możliwością, że dla wyższych wartości indukcji magnetycznej B jej kształt

odbięgać będzie od znormalizowanego. Prezentowane na rys. 6 i 7 wyniki potwierdzają jednak dużą zgodność obu metod pomiarowych i stąd przydatność metody watomierzowej z oscyloskopem, do oceny jakości rdzeni o masach rzędu do 30 kg.

Wnioski i kierunki dalszych prac

Ze względu na fakt, że badania wykonywano w ramach prac przemysłowych, dla celów wykazania przydatności proponowanej metody watomierzowej z oscyloskopem wykonano analizę przydatności proponowanej metody, w stosunku do metody znormalizowanej [1] i przeciętną zgodność metod pomiarowych uzyskano na poziomie $\pm 5\%$. Przedstawione wyniki pomiarów charakterystyk magnesowania $B_m = f(H_m)$, zmian przenikalności względnej $\mu_r = f(H_m)$ i jednostkowych strat mocy $P = f(B_m)$ wskazują na przydatność proponowanej metody watomierzowej z oscyloskopem. W kolejnym etapie prac przewiduje się powiększenie uniwersalności i dokładności metody poprzez wykorzystanie karty pomiarowej dla celów jednoczesnej akwizycji danych pomiarowych i automatyzacji prac, jak również powiększenie zdolności metrologicznej metody.

REFERENCES

- [1] PN-EN 60404-2:2003/A1:2008 Materiały magnetyczne – Część 2: Metody pomiaru własności magnetycznych stalowych blach i taśm elektrotechnicznych przy użyciu aparatu Epsteina
- [2] IEC 404-3:1999; Magnetic materials. Methods of measurements of soft magnetic properties of electrical steel and type with the use of single sheet tester
- [3] Pluta W., Rygał R., Soiński M.: Nowoczesne techniki określania własności materiałów magnetycznie miękkich. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 1999, nr 8, s.406-412.
- [4] Natęcz M., Jaworski J., *Pomiary magnetyczne*, PWN Warszawa 1965 r
- [5] Katalog rdzeni Unicore, www.aemcores.com.au
- [6] Pluta W.A.: Measurements of magnetic properties of electrical steel sheets for the aim of loss separation., *Journal of Electrical Engineering*, 12 (2011), 122-127
- [7] Pluta W., Soiński M Pomiar właściwości rdzeni ferromagnetycznych, Materiały konferencyjne XVIII Konferencji Energetyki, Gniew, 11-13.09.2013, s. 290-296

Authors: *prof. dr hab. inż. Marian Soiński, Politechnika Częstochowska, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: MSoiński@el.pcz.czyst.pl; dr inż. Wojciech Pluta, Politechnika Częstochowska, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: WPluta@el.pcz.czyst.pl*