

METROLOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI STANOWISKA DO POMIARU PORÓWNAWCZEGO ELEKTROMAGNESÓW

Andrzej RYLSKI¹, Jakub WOJTURSKI²

Politechnika Rzeszowska, Katedra Metrologii i Systemów Diagnostycznych, 35-959 Rzeszów, ul. W. Pola 2.

1. Tel.: 17 865 13 56 e-mail: rylski@prz.edu.pl

2. Tel.: 17 865 19 89 e-mail: wojtur@prz.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę pomiaru przenikalności magnetycznej zaworu elektromagnetycznego. Opisano metodę podstawienia, wykorzystywaną w pomiarach. Przeprowadzono analizę dokładności zaproponowanej metody oraz wskazano na główne źródła błędów, wpływających na niepewność wyznaczenia przenikalności magnetycznej rdzenia elektromagnesu.

Słowa kluczowe: przenikalność magnetyczna, pętla histerezy, zawór elektromagnetyczny.

1. PRZENIKALNOŚĆ MAGNETYCZNA

Przenikalność magnetyczna μ jest współczynnikiem proporcjonalności wiążącym ze sobą wartość indukcji magnetycznej B z wartością natężenia pola magnetycznego H [1, 2].

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (1)$$

gdzie: μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni.

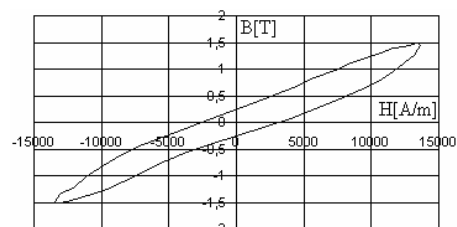
Wartość współczynnika μ zależy od:

- właściwości fizycznych i wewnętrznych naprężeń badanego materiału,
- punktu pracy $\mu = f(B, H)$,
- częstotliwości zmiany natężenia pola magnetycznego.

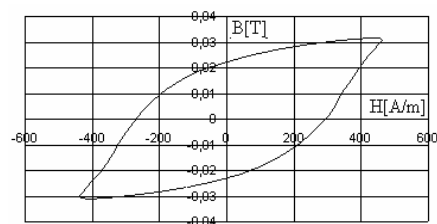
W procesie produkcji elektromagnesów, w ramach jednej serii produkcyjnej (ten sam materiał, podobne warunki produkcji), otrzymuje się część elektromagnesów nie spełniających kryteriów normy produkcyjnej. W procesie eksploatacji elektromagnesów, zdarza się taka zmiana parametrów związana z procesem zmęczeniowym materiału [3], która wymusza ich wymianę. W artykule opisano metodykę pomiaru zmiany wartości współczynnika μ w elementach toru magnetycznego elektromagnesu w stosunku do ich odpowiednich wzorców. Do pomiaru μ dostosowano koncepcję pomiaru z Aparatu Epsteina, który wykorzystywany jest do pomiaru właściwości magnetycznych blachy transformatorowych. Modyfikacje tej metody są stosowane przez wielu badaczy [4, 5, 6, 7].

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe wykresy histerezy indukcji magnetycznej dla elektromagnesu będącego przedmiotem badań oraz blachy transformatorowej wykonane w zaprojektowanym układzie pomiarowym.

a)



b)



Rys. 1. Przykład wykresu histerezy indukcji magnetycznej a) badanego elektromagnesu, b) blachy transformatorowej.

Wartość μ zmienia się w funkcji natężenia pola magnetycznego. Informuje o właściwościach magnetycznych badanego obiektu dla danych warunków pracy. W praktyce stosuje się kilka sposobów definiowania wartości tego współczynnika μ w zależności od funkcji jaką on spełnia w urządzeniu. Proponuje się badać właściwości elementów toru magnetycznego przez pomiar przenikalności magnetycznej początkowej μ_p i przenikalności powrotnej μ_{rec} . Poniżej przedstawiono właściwe definicje:

- przenikalność początkowa μ_p zdefiniowana jako wartość graniczna przenikalności przy amplitudzie zewnętrznego natężenia pola magnetycznego H_m zmierzającej do zera. Jest podstawowym parametrem materiałów magnetycznych podawanym w katalogach.

$$\mu_p = \lim_{H_m \rightarrow 0} \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_m}{H_m}, \quad (2)$$

gdzie: B_m – amplituda indukcji pola magnetycznego, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,

- przenikalność powrotna (w punkcie pracy), μ_{rec} zdefiniowana wzorem:

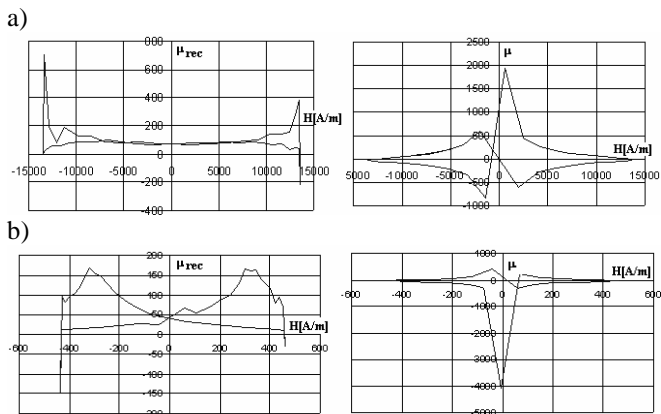
$$\mu_{rec} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (3)$$

gdzie: ΔB – zmiana indukcji magnetycznej spowodowana zmianą natężenia pola magnetycznego ΔH .

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany wartości współczynników μ_{rec} i μ w funkcji natężenia pola magnetycznego H . Odpowiednie wartości obliczono wg wzorów (4) lub (5) dla materiału rdzenia badanego elektromagnesu i blachy transformatorowej.

$$\mu_{rec} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}, H = \text{var}, \quad (4)$$

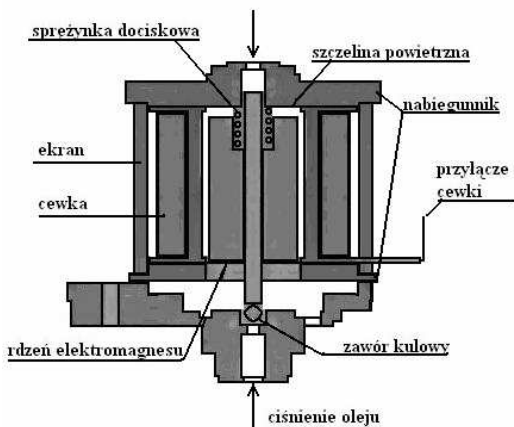
$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H}. \quad (5)$$



Rys. 2. Wykresy zmian wartości przenikalności magnetycznej a) badanego elektromagnesu, b) blachy transformatorowej.

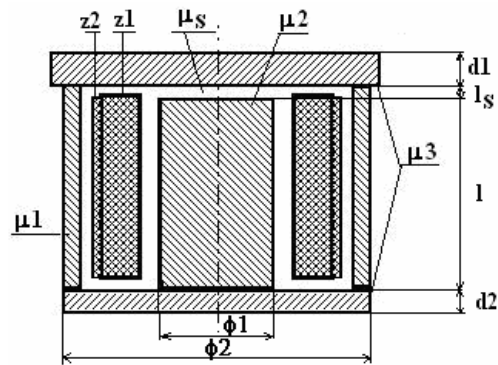
2. BADANY OBWÓD MAGNETYCZNY ZE SZCZELINĄ POWIETRZNĄ

W obwodach złożonych z kilku rodzajów materiałów magnetycznych i ze szczeliną powietrzną obliczenie μ jest złożone. Badany obiekt to zawór elektromagnetyczny. Uproszczony schemat zaworu przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Uproszczony schemat badanego zaworu elektromagnetycznego.

Obwód magnetyczny w zaworze stanowią: rdzeń elektromagnesu, dwa nabiegunki, ekran i szczelina powietrzna. Schemat obwodu magnetycznego elektromagnesu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat obwodu magnetycznego badanego elektrozaworu.

Pomiar przenikalności magnetycznej μ_2 materiału badanego elementu rdzenia można zrealizować metodą porównania z wzorcowym elementem rdzenia o znanej przenikalności magnetycznej μ_2 , opierając analizę na wzorach opisujących:

- zależność siły magnetomotorycznej od wartości prądu płynącego przez uzwojenie wzbudzające i jego liczby zwojów

$$\Theta = \sum_{i=1}^n H_i \cdot l_i = I_1 \cdot z_1, \quad (6)$$

gdzie: H_i – natężenie pola magnetycznego w i -tym elemencie obwodu magnetycznego, l_i – długość i -tego elementu obwodu magnetycznego, z_1 – liczba zwojów uzwojenia wzbudzającego,

- zależność natężenia pola magnetycznego H_2 od indukcji magnetycznej B_2 obliczonej na podstawie pomiaru napięcia U_2 indukowanego w uzwojeniu z_2 nawiniętym na badanym elemencie obwodu magnetycznego, zgodnie z rysunkiem 4:

$$H_2 = \frac{B_2}{\mu_2 \cdot \mu_0} = \frac{U_2}{\mu_2 \cdot \mu_0 \cdot 4 \cdot k_k \cdot z_2 \cdot s_2 \cdot f}, \quad (7)$$

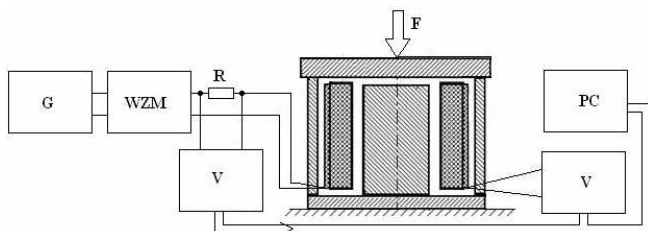
gdzie: μ_2 – przenikalność magnetyczna badanego elementu rdzenia, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, k_k – współczynnik kształtu napięcia U_2 , s_2 – powierzchnia przekroju elementu badanego rdzenia, f – częstotliwość napięcia U_2 .

Przenikalność μ można obliczyć ze wzoru:

$$\mu = \frac{U_2 \cdot l}{4 \cdot \mu_0 \cdot k_k \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot s_2 \cdot f \cdot I_1}. \quad (8)$$

Zakładając przeprowadzenie pomiarów metodą podstawienia (rys. 5) polegającą na pomiarze napięcia wzbudzenia U_2 kolejno dla elementu wzorcowego rdzenia i U_2' elementu badanego w tych samych warunkach otoczenia i dla tych samych parametrów obwodu magnetycznego, można obliczyć wartość przenikalności magnetycznej elementu badanego:

$$\mu_2' = \frac{U_2'}{U_2} \cdot \mu_2 \quad (9)$$



Rys. 5. Schemat układu do pomiaru przenikalności magnetycznej badanego elementu obwodu magnetycznego metodą podstawienia.

3. DOKŁADNOŚĆ METODY PODSTAWIENIA W POMIARZE μ'

Wielkości, których zmiana wartości ma wpływ na zmianę wartości mierzonego μ' , można wskazać analizując wzory (6) i (7). Najważniejsze przyczyny błędów wyznaczenia wartości μ' opisano poniżej.

1. Prąd wzbudzenia I_1 powinien mieć tę samą wartość przy pomiarze z rdzeniem wzorcowym i rdzeniem badanym. Występują tu dwa źródła błędów:

- błąd ustawienia wartości oraz niestabilność wartości prądu w czasie pomiaru,
- dokładność przyrządu pomiarowego i rezystora wzorcowego, na którym mierzony jest spadek napięcia proporcjonalny do prądu wzbudzenia.

2. Błąd spowodowany niestabilnością częstotliwości f źródła prądu wzbudzenia.

3. Błąd wynikający z ograniczonej dokładności pomiaru napięcia U_2 indukującego się w uzwojeniu z_2 .

4. Błąd stałości wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego w czasie pomiarów, a w szczególności długości szczeliny powietrznej l_S , która zależy od sposobu ułożenia elementów obwodu magnetycznego w trakcie montażu obwodu i od siły docisku elementów.

5. Błąd od zmiany współczynnika kształtu napięcia zasilającego elektromagnes.

Obliczona, zgodnie ze wzorem (10), wartość względnej złożonej niepewności standardowej jest rzędu $\pm 0,5\%$.

$$u_r(\mu) = \sqrt{\frac{(u_r(U_2))^2 + (u_r(l))^2 + (u_r(k_k))^2}{(u_r(s_2))^2 + (u_r(f))^2 + (u_r(I_1))^2}} \quad (10)$$

W zaproponowanej metodzie podstawienia błędy o charakterze systematycznym są eliminowane. Można przewidywać, że wartość niepewności zmaleje do wartości wynikającej z dyskretyzacji zastosowanych przyrządów oraz powtarzalności wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego montowanego do każdego pomiaru z rdzeniem wzorcowym i badanym.

4. WNIOSKI

1. Zaproponowana metoda różnicowa badania elementów magnetycznych w rzeczywistych obwodach magnetycznych pozwala na osiągnięcie względnej niepewności standardowej pomiaru o wartości rzędu 0,5%.
2. Największy wpływ na błąd pomiaru różnicy przenikalności magnetycznych ma powtarzalność złożenia obwodu magnetycznego.
3. W czasie badań zauważono, że na powtarzalność złożenia obwodu magnetycznego ma wpływ dokładność wykonania powierzchni podzespołów magnetycznych, stykających się w obwodzie oraz siła ich docisku.

5. LITERATURA

1. Bolkowski S., Teoria obwodów elektrycznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
2. Żurek Z.H., Szudyga M., Magnetometric diagnostics of construction al steel, Electrical Review, Przegląd Elektrotechniczny, nr 1, 2009.
3. Żurek Z, Janeczek T., Maciejewski J., Parametry magnetyczne stali jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 09, 2008.
4. Tumański S., Liszka A., The methods and devices for scanning of magnetic fields, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002.
5. Kwiczala J, Kolano-Burian A., Pomiary parametrów materiałów magnetycznych przy alternatywnych wariantach wymuszenia sygnału magnesującego. Pomiary Automatyka Kontrola nr 12, 2009.
6. Żurek Z, Czastkiewicz Z., Diagnostyka magnetyczna stali paramagnetycznych. Pomiary Automatyka Kontrola nr 4, 2009.
7. Kwiczala J, System pomiarowy do wyznaczania parametrów materiałów magnetycznych. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 06, 2004.

METROLOGICAL PROPERTIES OF THE SET-UP FOR COMPARISON MEASUREMENT OF ELECTROMAGNETS

In this article a method for permeability measurement of electromagnetic valve was described. Two coefficients for investigation of magnetic path were proposed. A method of substitution used for calculation of these coefficient was described. Analysis of accuracy of proposed method was performed. It was also pointed, that the essential reason of errors is a change of magnetic loop dimensions. This change is a main source of total uncertainty of calculated permeability.

Keywords: permeability, hysteresis loop, electromagnetic valve.