

Przegląd wybranych metod wyznaczania strat mocy w ferromagnetykach przy przemagnesowaniu osiowym

Streszczenie. Artykuł przedstawia wybrane metody wyznaczania całkowitych strat mocy i właściwości dynamicznych materiałów magnetycznie miękkich w warunkach przemagnesowania osiowego. W pracy opisano metody techniczne, szczególnie metodę watomierzową z wykorzystaniem aparatu Epsteina, metodę oscyloskopową, metodę ferrometryczną i kompensacyjną oraz wybrane metody mostkowe przeznaczone do wyznaczania całkowitych strat mocy czynnej w ferromagnetykach.

Abstract. The article presents selected methods for determining the total power loss and dynamic properties of soft magnetic materials under axial magnetisation. The paper describes technical methods, especially the wattmeter method using Epstein's frame, the oscilloscope method, the ferrometric and compensation methods, and selected bridge methods for determining total active power losses in ferromagnets. (A review of selected methods for determining power losses in ferromagnets under axial magnetisation).

Słowa kluczowe: ferromagnetyzm, magnetyzacja, histereza, straty mocy, aparat Epsteina.

Keywords: ferromagnetism, magnetisation, hysteresis loop, power losses, Epstein frame.

Wstęp

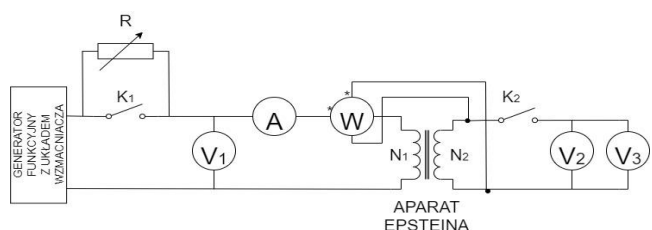
Stratność jest parametrem charakteryzującym materiały ferromagnetyczne [1, 2]. Strumień magnetyczny, przenikający rdzeń maszyn elektrycznych i transformatorów, przenosi energię, której część tracona jest bezpowrotnie i oddawana do otoczenia w postaci ciepła. Powstałe tym samym straty mocy związane z przemagnesowaniem rdzenia są istotnym parametrem opisującym właściwości magnetyczne blach i taśm elektrotechnicznych [3-6]. Potrzeba porównywania różnych materiałów magnetycznych pod kątem ich przydatności do budowy urządzeń elektrycznych, wykształciła na przestrzeni lat wiele metod i sposobów przeprowadzania pomiarów całkowitych strat mocy czynnej, powstałych na skutek przemagnesowania [7,8]. Do najczęściej wykorzystywanych obecnie metod wyznaczania strat mocy zaliczyć można metodę watomierzową z wykorzystaniem aparatu Epsteina oraz metodę oscyloskopową [9]. Niniejszy artykuł stanowi skrótowy przegląd różnych metod wyznaczania strat mocy w obwodach magnetycznych, takich jak metody techniczne wykorzystujące jarzmo Lloyda-Fischera, aparat Hermana, metoda różnicowa, ferrometryczna, kompensacyjna, mostkowa czy kalorymetryczna.

Metody techniczne

Metody techniczne umożliwiają wyznaczenie całkowitych strat mocy oraz charakterystyk dynamicznych indukcji w funkcji natężenia pola magnetycznego $B=f(H)$ na podstawie pomiaru prądu magnesującego w uzwojeniu pierwotnym próbki, z którego wyznaczane jest natężenie pola magnetycznego H , oraz na podstawie pomiaru napięcia wyindukowanego w uzwojeniu wtórnym próbki, z którego wyznaczana jest indukcja magnetyczna B . Całkowite straty mocy wyznaczane są z mocy zmierzonej przez watomierz. Próbka może być wykonana w postaci pasków, wyciętych z badanej blachy, lub w postaci toroidu, dla którego wyniki pomiarów będą dokładniejsze, m.in. z uwagi na brak występowania szczelin powietrznych w próbkach pierścieniowych [10]. Dokładność metody maleje ze wzrostem szczelin powietrznych i strumienia rozproszenia w próbce, dla którego wymagana jest kompensacja pola odmagnesowującego dodatkowymi uzwojeniami, np. uzwojeniem kompensacyjnym.

Metoda watomierzowa z wykorzystaniem aparatu Epsteina

Aparat Epsteina jest urządzeniem przeznaczonym do oceny właściwości magnetycznych blach elektrotechnicznych, pracującym jak nieobciążony transformator. Zbudowany jest z czterech wycinków blach ułożonych prostopadle do siebie i dociśniętych w narożach aparatu. Wokół każdego ramienia aparatu nawinięte są uzwojenia pierwotne i wtórne, oba po $N_1 = N_2 = 700$ zwojów, co czyni aparat transformatorem o przekładni równej 1, gdzie badana próbka stanowi rdzeń tego transformatora [11,12]. Próbki do badań tworzy się z pasków blach o wymiarach 3 cm x 28 cm ułożonych na zakładkę w narożnikach aparatu, a liczba pasków składających się na badaną próbkę jest wielokrotnością czterech. Ze względu na anizotropowe własności blach elektrotechnicznych połowa pasków blach powinna być cięta równolegle a połowa prostopadle do kierunku walcowania arkusza, a same arkusze blach powinny być od siebie odizolowane. Proces pomiaru stratności blach aparatem Epsteina jest znormalizowany i opisany w normie PN-EN 60404-2:2003. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania stratności ferromagnetyków przy wykorzystaniu aparatu Epsteina

Cewkę prądową watomierza włącza się po stronie pierwotnej aparatu Epsteina, tor napięciowy włącza się przeciwnie w obwód wtórny aparatu Epsteina z uwagi na ujemny $\cos\varphi$. Podczas pomiaru mocy watomierzem, amperomierz powinien być zwarty, aby ograniczyć wprowadzanie w obwód dodatkowej rezystancji, zwiększającej odkształcenie pola magnetycznego. Woltomierz prostownikowy wartości średniej V_2 służy do wyznaczenia indukcji maksymalnej B_{max} , natomiast woltomierz wartości skutecznej V_3 do sprawdzenia kształtu krzywej napięcia, które powinno być sinusoidalne, ale może

być odkształcone ze względu na odkształcenia prądu magnesującego rdzeń podczas jego nasycania przy dużych wartościach indukcji magnetycznej. Woltomierz wartości skutecznej V_1 w obwodzie magnesującym wykorzystywany jest do kontroli wartości indukcji magnetycznej na niezmiennym poziomie po odłączeniu od układu woltomierzy V_2 i V_3 . Przy sinusoidalnym przebiegu indukowanej SEM E_2 wskazania obu woltomierzy są jednakowe. Podczas pomiaru mocy woltomierz wartości skutecznej V_3 odłącza się od układu, aby nie wprowadzać zbędnych strat mocy wynikających z mocy traconej na rezystancjach wewnętrznych przyrządów pomiarowych. W celu uzyskania w próbce zadanej wartości indukcji maksymalnej, np. 1,5 T, napięcie zasilające aparat Epsteina doregulowuje się, tak aby woltomierz wartości średniej V_2 wskazywał wartość obliczoną ze wzoru:

$$(1) \quad U_{2sr} = 4fN_2 \left(\frac{R_i}{R_i + R_t} \right) SB_{max}.$$

Watomierz W mierzy moc P_m pobieraną przez cewkę watomierza oraz moc pobieraną przez woltomierz V_2 . Całkowite straty badanej próbki P_{tot} oblicza się z zależności (2). W uproszczonych opracowaniach wyników pomiarów pomija się moc P_2 , pobraną przez przyrządy pomiarowe, przyjmując że całkowite straty mocy są równe mocy zmierzonej przez watomierz, czyli $P_{tot} = P_m$.

$$(2) \quad P_{tot} = P_m - P_2 = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1,111 \cdot U_{2sr})^2}{R_i},$$

gdzie: N_1 – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, N_2 – liczba zwojów uzwojenia wtórnego, P_{tot} – całkowite straty mocy, P_m – moc zmierzona watomierzem, P_2 – moc pobrana przez obwody napięciowe mierników obwodu wtórnego, U_{2sr} – średnia wartość napięcia wyindukowanego po stronie wtórnej.

Rezystancja R_i reprezentuje rezystancję zastępczą przyrządów znajdujących się po stronie wtórnej obwodu, to jest watomierza o rezystancji R_{wat} i woltomierza o rezystancji R_v .

$$(3) \quad R_i = \frac{R_{wat} R_v}{R_{wat} + R_v}.$$

Stratność całkowita:

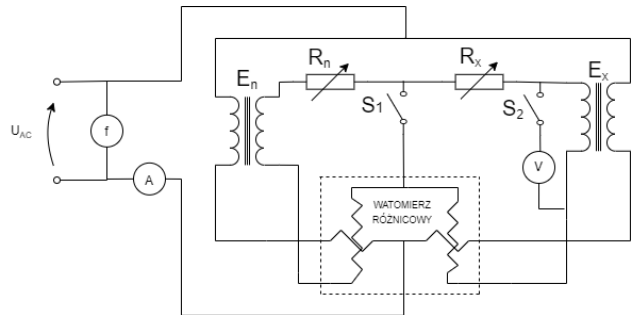
$$(4) \quad p = \frac{P_{tot}}{m_a} = \frac{4P_{tot}l}{ml_m},$$

gdzie: p – stratność całkowita próbki, l – długość paska próbki, l_m – średnia długość drogi strumienia magnetycznego, m – masa próbki, m_a – efektywna masa próbki.

Wyznaczając stratność całkowitą ze wzoru (4) masa próbki m nie może być uwzględniona w całości jako masa żelaza ze względu na nierównomierny rozkład pola magnetycznego w narożnikach aparatu Epsteina oraz niejednakowy stopień udziału masy żelaza w powstawaniu strat. Z tego powodu stratność całkowitą p uzyskuje się przez podzielenie strat całkowitych P_{tot} przez efektywną masę próbki m_a . Podstawową wadą aparatu Epsteina jest duży koszt i czasochłonność przygotowania próbek do badań, tj. wycięcia wielu pasków próbki z arkusza blach, jak również podawanie wyników uśrednionych dla co najmniej 12 pasków [13].

Metoda różnicowa pomiaru stratności

Pomiar stratności w metodzie różnicowej polega na porównaniu stratności próbki badanej E_x oraz próbki wzorcowej E_n przy wykorzystaniu dwóch aparatów Epsteina, watomierza różnicowego, woltomierza wartości skutecznej i amperomierza. Badane próbki powinny mieć identyczne wymiary i wagę oraz powinny być wykonane z materiałów o zbliżonych właściwościach magnetycznych. Watomierz różnicowy ma po dwa niezależne uzwojenia prądowe i napięciowe. W układzie pracuje on jak wskaźnik zera, więc przy identycznych stratach w obu próbkach wskazanie watomierza nie zmienia się i wynosi zero. Cewki prądowe watomierza są włączone szeregowo do obwodów pierwotnych aparatów Epsteina, a cewki napięciowe są połączone z rezystorami dekadowymi do uzwojeń wtórnych, jak na rysunku 2.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego do pomiaru strat mocy metodą różnicową

Jeżeli straty w próbkach różnią się od siebie, wskazówka watomierza zmieni położenie. Odchylenie watomierza można doprowadzić do zera, zmieniając wartości rezystorów dekadowych R_n i R_x zgodnie z zależnością (5):

$$(5) \quad \frac{P_n}{P_x} = \frac{R_n + R_{wn}}{R_x + R_{wx}},$$

gdzie: P_n – straty w badanej próbce, P_x – straty we wzorcowej próbce, R_{wn} , R_{wx} – rezystancja cewek napięciowych watomierza.

Stratność badanej próbki p_x można obliczyć korzystając ze wzoru:

$$(6) \quad p_x = \frac{P_x}{m} = p_n \frac{R_x + R_{wx}}{R_n + R_{wn}},$$

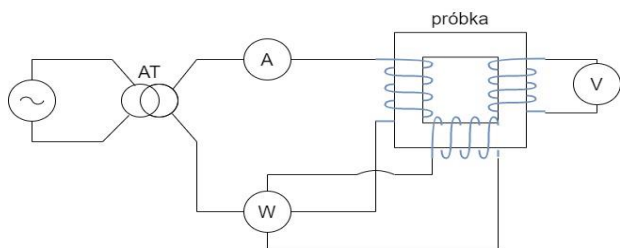
gdzie: p_n – stratność wzorcowej próbki.

W metodzie różnicowej znoszą się błędy spowodowane niejednakowym nastawieniem częstotliwości oraz odkształceniem od sinusoidy siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach stron wtórnych aparatów. Wspomniane czynniki mają jednakowy wpływ na próbki wzorcową i badaną. Przyjmuje się, że stratność badanej próbki, uzyskana metodą różnicową, wyznaczona jest z błędem rzędu $\pm 5\%$. Głównym źródłem błędów pomiarowych są fizyczne różnice w wykonaniu dwóch aparatów Epsteina, które nigdy nie są identyczne, a więc różnice w ich wymiarach, wykonaniu cewek, różnej sily docisku blach w narożach. Jednym ze sposobów ograniczenia błędów przy pomiarach strat jest wykorzystanie dodatkowej próbki, zwanej roboczą, oprócz próbki wzorcowej i próbki badanej, którą montuje się w miejsce próbki badanej i wykonuje pomiar. Następnie w miejsce próbki wzorcowej montuje się próbkę badaną i wyznacza

charakterystykę $E_x=f(E_n)$. Sposób ten nazywany jest metodą podstawieniową.

Jarzmo Lloyd-Fischera

Jarzmo Lloyda-Fishera przeznaczone jest do magnesowania próbek ramowych, składających się z pasków blachy o wymiarach 25 cm x 5 cm. Cztery paski, po jednym na każde ramię, tworzą zamknięty obwód w kształcie kwadratu, połączony w narożnikach za pomocą ugiętych blach, co sprawia, że w miejscach łączenia przekrój obwodu magnetycznego podwaja się. Blachy umieszczone są pod czterema identycznymi cewkami połączonymi szeregowo tworząc uzwojenie pierwotne jarzma. Pod cewką magnesującą znajdują się dwa uzwojenia wtórne. Cewkę prądową watomierza włącza się do obwodu magnesującego, a cewkę napięciową watomierza dołącza się do uzwojenia wtórnego. Wartość prądu magnesującego dobiera się przy z góry ustalonej wartości indukcji maksymalnej, której odpowiada wartość napięcia U_V wskazywana przez woltomierz wartości skutecznej. Schemat pomiarowy metody wykorzystującej jarzmo Lloyda-Fishera przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania całkowitych strat mocy jarzmem Lloyda-Fishera

Związek między wskazaniem woltomierza a indukcją maksymalną wyrażony jest przez równanie:

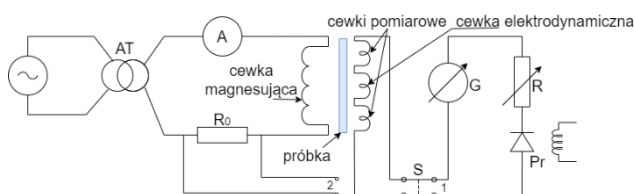
$$(7) \quad U_V = 4fkN_2SB_{\max},$$

gdzie: k – współczynnik kształtu napięcia po stronie wtórnej, S – przekrój czynny próbki.

Całkowite straty mocy próbki wyznacza się korzystając z zależności:

$$(8) \quad P_{\text{tot}} = P_m \left(1 + \frac{R_c}{R_{\text{wu}}} \right) - \frac{U_V^2}{R_c + R_{\text{wu}}},$$

gdzie: R_c – rezystancja uzwojenia wtórnego, R_{wu} – rezystancja cewki napięciowej watomierza.



Rys.4. Schemat układu do pomiaru całkowitych strat mocy aparatem Hermmana

Aparat Hermmana

Pomiar strat aparatem Hermmana polega na pomiarze mocy traconej na magnesowanie pojedynczego paska

blachy. Zasada działania zbliżona jest do metody watomierzowej, z tą różnicą, że do pomiaru mocy nie wykorzystuje się watomierza. Cewka magnesująca wytwarza zmienne jednorodne pole magnetyczne, wewnątrz którego umieszcza się badaną próbkę, na której nawinięte są dwie cewki pomiarowe połączone szeregowo z cewką elektrodynamiczną (rys. 4).

Przez cewkę elektrodynamiczną płynie prąd wytworzony na skutek indukowania w cewkach pomiarowych napięcia proporcjonalnego do pochodnej indukcji. Pod wpływem przepływającego prądu i pola magnetycznego cewki magnesującej, cewka elektrodynamiczna obraca się, a jej wychylenie proporcjonalne jest do strat mocy w próbce. Tym samym cewka ta spełnia podobną funkcję, jak cewka napięciowa w watomierzu. Odchylenie cewki skaluje się w jednostkach mocy traconej w próbce, a sam proces skalowania przeprowadza się przy przełączniku S w pozycji 2, gdy próbka nie jest jeszcze umieszczona wewnątrz aparatu. Stałą C aparatu Hermmana wyznacza się, gdy cewka elektrodynamiczna przesunie się o kąt β .

$$(9) \quad C = \frac{kR_0I_{\text{sk}}^2}{N_2\beta},$$

gdzie: k – stała cewki magnesującej, I_{sk} – wartość skuteczna prądu w obwodzie cewki magnesującej, N_2 – liczba zwojów cewki elektrodynamicznej, R_0 – rezystancja rezystora w uzwojeniu magnesującym.

Pomiar strat mocy odbywa się w pozycji 1 przełącznika S . Z indukcją maksymalną B_{\max} związana jest wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu wtórnym, do pomiaru której korzysta się z galvanometru G oraz prostownika półokresowego P_r . Wartość średnia napięcia wtórnego powiązana jest z indukcją maksymalną wzorem:

$$(10) \quad U_{2\text{sr}} = 2N_2SfB_{\max},$$

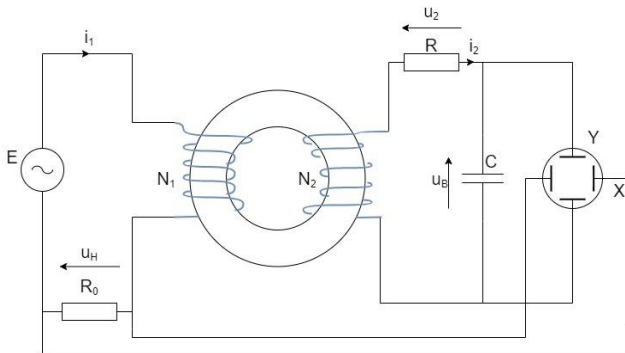
gdzie: N_2 – liczba zwojów po stronie wtórnej, nawinięta na próbkę, S – przekrój czynny próbki.

Po ustawieniu prądu magnesującego tak, aby indukcja w próbce odpowiadała indukcji maksymalnej, dokonuje się odczytu wychylenia cewki elektrodynamicznej celem obliczenia strat całkowitych $P_{\text{tot}} = C \cdot \beta$. Błąd pomiaru rośnie wraz ze wzrostem indukcji. Przy wartościach indukcji do 1 T błąd pomiaru wynosi około 5%, natomiast przy indukcji maksymalnej 1,5 T całkowite straty wyznaczone aparatem Hermmana są nawet o 20% większe niż rzeczywiste straty mocy [7].

Metoda oscyloskopowa

Wyznaczanie strat metodą oscyloskopową sprowadza się do wykreślenia pętli histerezy poprzez pomiar prądu magnesującego oraz napięcia, wyindukowanego w cewce z badaną próbką. Metoda oscyloskopowa jest metodą bezpośrednią, pozwalającą na zobrazowanie na ekranie oscyloskopu pętli histerezy w postaci krzywej w układzie współrzędnych indukcja / natężenie pola magnetycznego, co stanowi jej zaletę. Wadą natomiast jest stosunkowo mała dokładność pomiaru na poziomie 5-10%. Metoda ta przeznaczona jest przede wszystkim do badania próbek pierścieniowych w zmiennych polach magnetycznych o częstotliwościach do 5000 Hz. Pętlę histerezy otrzymuje się poprzez doprowadzenie do wejścia wzmacniacza X odchylenia poziomego oscyloskopu sygnału napięciowego, który jest proporcjonalny do natężenia pola magnetycznego, oraz sygnału prądowego doprowadzonego do wejścia wzmacniacza Y odchylenia pionowego, proporcjonalnego do indukcji magnetycznej. Napięcie u_H , proporcjonalne do natężenia pola magnetycznego wyznacza się mierząc

spadek napięcia na rezystorze R_0 wpiętym szeregowo z uzwojeniem magnesującym. W celu otrzymania sygnału proporcjonalnego do indukcji magnetycznej stosuje się układ całkujący w postaci czwornika RC , włączonego do zacisków uzwojenia wtórnego próbki. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia pętli histerezy metodą oscyloskopową

Wartość chwilowa natężenia pola magnetycznego:

$$(11) \quad H = \frac{i_1 N_1}{l_m},$$

gdzie: i_1 – prąd po stronie pierwotnej (magnesujący), N_1 – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, l_m – średnia długość drogi strumienia magnetycznego.

Stąd wartość napięcia u_H , proporcjonalnego do natężenia pola H , wynosi:

$$(12) \quad u_H = i_1 R_0 = \frac{l_m R_0}{N_1} H = k_H H.$$

Wartość napięcia u_B członu całkującego, oscyloskopu, wynosi:

$$(13) \quad u_B = \int_0^t i_2 dt,$$

gdzie: i_2 – prąd po stronie wtórnej.

Napięcie u_2 przybliżyć można zależnością:

$$(14) \quad u_2 \approx R i_2.$$

Stąd prąd i_2 płynący w układzie całkującym wynosi:

$$(15) \quad i_2 \approx \frac{u_2}{R} = \frac{S N_2}{R} \frac{dB}{dt},$$

gdzie: S – pole przekroju poprzecznego rdzenia, B – indukcja magnetyczna, N_2 – liczba zwojów uzwojenia wtórnego.

Podstawiając (15) do (13) otrzymujemy wartość chwilową napięcia u_B na kondensatorze, proporcjonalną do chwilowej wartości indukcji w próbce B :

$$(16) \quad u_B = \frac{S N_2}{RC} B = k_B B.$$

Poszukiwana energia W strat przypadających na jednostkę objętości badanego materiału w pojedynczym cyklu magnesowania [Ws/cm^3] wyrażona jest w postaci zależności:

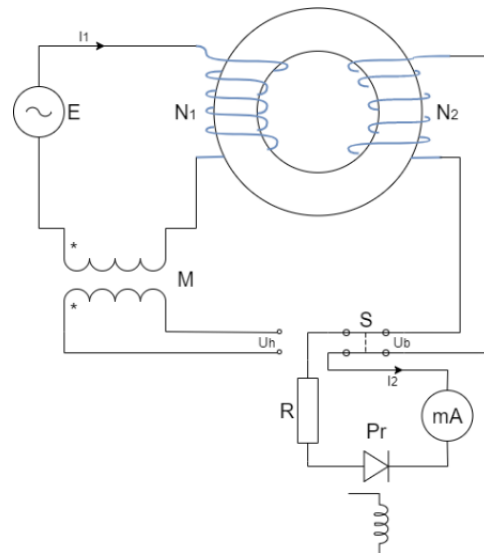
$$(17) \quad W = \frac{RC}{R_0 V} S_x S_y A,$$

gdzie: V – objętość rdzenia, $V = l_m S$, S_x – czułość kanału X oscyloskopu, S_y – czułość kanału Y oscyloskopu, A – pole powierzchni pętli histerezy.

Podczas wyznaczania strat metodą oscyloskopową konieczne jest zwracanie uwagi czy wyświetlona na ekranie oscyloskopu pętla histerezy ma pożądany kształt, ponieważ wszelkie występujące zmiany kształtu pętli i jej deformacje mogą prowadzić do znacznych błędów pomiarowych. Źródłem zniekształceń mogą być indukcyjności rezystora R_0 , pojemności pasożytnicze w uzwojeniach czy zakłócenia sygnału pochodzące ze źródła zasilającego.

Metoda ferrometryczna

Metoda ferrometryczna przeznaczona jest do badania materiałów magnetycznych, w których przebiegi natężenia pola i indukcji pozbawione są parzystej harmonicznej oraz składowej stałej. Do wyznaczenia pętli histerezy metodą ferrometryczną wykorzystuje się ferrometr, który składa się z prostownika i przesuwnika fazowego. Zasadę działania ferrometru przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Zasada działania ferrometru

Badana próbka, mająca uzwojenie pierwotne i wtórne o liczbie zwojów odpowiednio N_1 oraz N_2 , magnesowana jest prądem magnesującym I_1 . Napięcie U_b wyindukowane po stronie wtórnej próbki jest proporcjonalne do pochodnej indukcji, a napięcie U_h po stronie wtórnej wzorca indukcyjności wzajemnej M – do pochodnej natężenia pola magnetycznego.

$$(18) \quad U_b = -N_2 S \frac{\partial B}{\partial t},$$

$$(19) \quad U_h = M \frac{l}{N_1} \frac{\partial H}{\partial t},$$

gdzie: S – przekrój poprzeczny próbki, l – długość próbki.

Wartość chwilowa indukcji i natężenia pola wyznaczana z wartości średniej półkresowej napięć U_b i U_h , zmierzonych przez miliamperomierz z prostownikiem sterowanym przesuwnikiem fazowym. W ten sposób dokonując pomiaru indukcji i natężenia w jednakowej fazie prostownika otrzymywane są kolejne punkty pętli histerezy. Wartość strat wyznacza się poprzez wyznaczenie dwóch współrzędnych pętli histerezy lub poprzez planimetrywanie pętli histerezy. Wiedząc, że straty na przemagnesowanie są proporcjonalne do pola powierzchni pętli histerezy, straty mocy w badanej próbce wynoszą:

$$(20) \quad P_{\text{tot}} = Sl \frac{1}{T} \oint H \delta B = Sl \frac{1}{T} S_x S_y A,$$

gdzie: A – powierzchnia pętli histerezy, S_x – skala na osi natężenia, S_y – skala na osi indukcji, T – okres przebiegu.

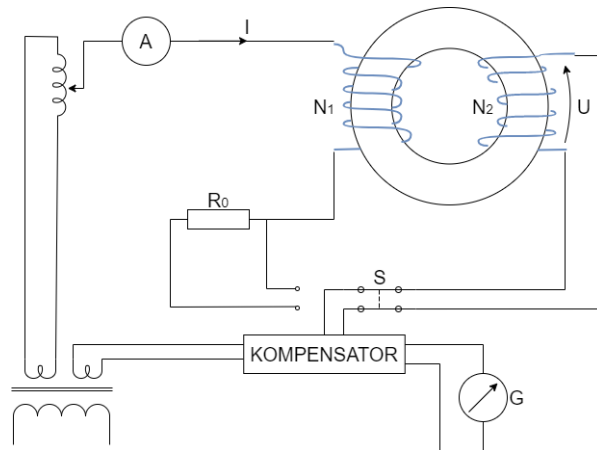
Metoda dwóch współrzędnych jest metodą szybszą i mniej pracochłonną niż planimetrywanie wykreślonej pętli histerezy, lecz przez to mniej dokładną. Polega na doprowadzeniu do ferrometru napięć U_h i U_b poprzez filtr, który przepuszcza podstawowe harmoniczne napięcie, a przesuwnik fazowy nastawia kąt tak, aby możliwym było wyznaczenie natężenia pola i indukcji. W ten sposób możliwe jest wyznaczenie strat związanych z podstawowymi harmonicznymi, które równe są stratom całkowitym tylko wtedy, jeżeli przebiegi indukcji i natężenia są sinusoidalne. W przypadku, gdy przebiegi B i H są przebiegami odkształconymi, wyznaczone straty są sumą strat przenoszonych przez harmoniczne przebiegów. Ferrometry konstruowane są do częstotliwości 5 kHz, a błąd pomiarowy przy pomiarze ferrometrem wynosi do 10% [14].

Metoda kompensacyjna

Metoda kompensacyjna polega na wyznaczeniu natężenia pola przez pomiar prądu magnesującego oraz wyznaczeniu indukcji magnetycznej poprzez pomiar napięcia indukowanego w uzwojeniu pierwotnym, przy pomocy kompensatora. Wyznaczenie strat odbywa się przez pomiar przesunięcia fazowego pomiędzy harmonicznymi indukcji i natężenia pola. Tak wyznaczone straty równe są stratom całkowitym, jeżeli przebieg indukcji i lub natężenia jest przebiegiem sinusoidalnym. Badana próbka ma dwa uzwojenia, pierwotne o liczbie zwojów N_1 i wtórne o liczbie zwojów N_2 . Natężenie pola wyznaczone jest poprzez pomiar prądu magnesującego I po stronie uzwojenia pierwotnego, a indukcja poprzez pomiar napięcia U indukowanego po stronie wtórnej. Wartość prądu I oraz napięcia U mierzona jest przy pomocy kompensatora prądu zmiennego, w którym zmierzone napięcie kompensowane jest dwoma napięciami przesuniętymi w fazie o $\pi/2$, co zapewnione jest przez indukcyjność wzajemną M . Prąd magnesujący obliczany jest pośrednio ze spadku napięcia na rezystorze wzorcowym R_0 . Schemat układu do wyznaczenia strat metodą kompensacyjną przedstawiony jest na rysunku 7.

Pomiar strat na przemagnesowanie metodą kompensacyjną sprowadza się do wyznaczenia przesunięcia fazowego pomiędzy pierwszą harmoniczną prądu strony pierwotnej oraz napięcia strony wtórnej, co przekłada się na przesunięcie fazowe między indukcją a natężeniem pola w próbce. Dla sinusoidalnych przebiegów indukcji i natężenia pola całkowite straty mocy można opisać wzorem:

$$(21) \quad P_{\text{sin}} = \pi f S B_1 H_1 \sin \delta = \frac{N_1}{N_2} U I_{1h},$$



Rys.7. Układ pomiarowy do wyznaczenia strat metodą kompensacyjną

gdzie: B_1 – amplituda pierwszej harmonicznego indukcji, H_1 – amplituda pierwszej harmonicznego natężenia pola, δ – przesunięcie fazowe między natężeniem pola H_1 a indukcją B_1 , U – napięcie w uzwojeniu wtórnej pierwszej harmonicznego zmierzone kompensatorem, I_{1h} – składowa czynna prądu strony pierwotnej.

W rzeczywistych układach pomiarowych w przebiegach indukcji i natężenia często występują wyższe harmoniczne, co powoduje występowanie odkształceń w przebiegu napięcia indukowanego po stronie wtórnej uzwojenia próbki oraz w prądzie strony pierwotnej. Z tego względu wyróżnić należy wzór pozwalający wyznaczyć straty mocy przy przebiegach odkształconych:

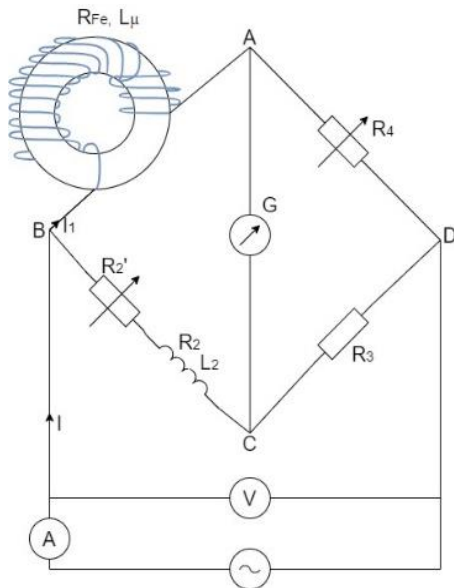
$$(22) \quad P_{\text{harm}} = \frac{N_1}{N_2} U_1 I_1 \sin \delta - R(I^2 - I_{1h}^2),$$

gdzie: I – wartość skuteczna odkształconego prądu strony pierwotnej zmierzona amperomierzem, I_1 – wartość skuteczna podstawowej harmonicznego prądu strony pierwotnej zmierzona kompensatorem, R – całkowita rezystancja obwodu pomiarowego.

Metoda kompensacyjna znajduje zastosowanie w badaniu próbek materiałów ferromagnetycznych w polach o częstotliwościach 16 Hz – 20 kHz [14].

Metody mostkowe

Pomiar metodą mostkową polega na wyznaczeniu strat z rezystancji próbki w układzie mostka prądu przemiennego dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego. Badana próbka ma jedno uzwojenie i jest magnesowana polem sinusoidalnie zmiennym w celu wyznaczenia indukcyjności i rezystancji strat wydzielanych w próbce. Wybór sposobu wyznaczenia natężenia pola H , na podstawie pomiaru prądu magnesującego, wpływa na dokładność wyznaczenia strat. Metoda ta przeznaczona jest głównie do badania próbek pierścieniowych. Pomiar właściwości materiałów ferromagnetycznych metodą mostkową polega na wyznaczeniu rezystancji zastępczej badanej próbki, zazwyczaj toroidalnej z nawiniętym jednym uzwojeniem, rzadziej z dwoma uzwojeniami. Metody mostkowe umożliwiają pomiar strat powstałych na skutek przesunięcia podstawowych harmonicznych indukcji i natężenia pola magnetycznego. Wyróżnia się wiele rodzajów mostków pomiarowych służących do badania właściwości magnetycznych materiałów ferromagnetycznych, między innymi: mostek Maxwella-Wiena, mostek Andersona, mostek Campbella czy mostek Maxwella, który przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Układ do pomiaru własności magnetycznych próbki ferromagnetycznej mostkiem Maxwella

W mostku Maxwella badana próbka pierścieniowa znajduje się w gałęzi AB mostka, wzorec indukcyjności L_2 o rezystancji R_2 znajduje się w gałęzi BC, a w pozostałych gałęziach znajdują się rezystory o regulowanej wartości rezystancji. Badana próbka ma indukcyjność L_x i rezystancję R_x , obejmującą rezystancję reprezentującą straty wydzielane w obwodzie ferromagnetycznym oraz rezystancję uzwojenia R_1 . Pomiar polega na zrównoważeniu mostka poprzez zmianę rezystancji rezystorów R_4 i R_2' , tak aby różnica potencjałów pomiędzy gałęziami AC wynosiła zero. W tym celu stosuje się wskaźnik zera – galwanometr G. Pomiar wykonuje się dla różnych wartości napięcia zasilającego.

Warunkiem równowagi mostka jest spełnienie równania:

$$(23) \quad R_3(j\omega L_{Fe} + R_1 + R_{Fe}) = R_4(j\omega L_2 + R_2 + R_2')$$

Stąd rezystancja reprezentująca straty wydzielane w rdzeniu R_{Fe} wynosi:

$$(24) \quad R_{Fe} = (R_2 + R_2') \frac{R_4}{R_3} - R_1.$$

Prąd magnesujący I_1 obliczony na podstawie wskazania prądu I amperomierza wynosi:

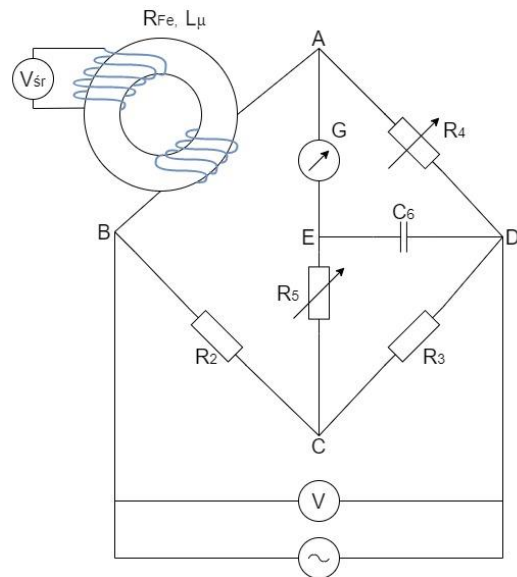
$$(25) \quad I_1 = I \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$

Zakładając sinusoidalny przebieg natężenia pola, całkowite straty mocy P_{tot} wynoszą:

$$(25) \quad P_{tot} = I_1^2 R_{Fe}.$$

W mostku Maxwella-Wiena do równoważenia mostka wykorzystuje się kondensator C_3 o zmiennej pojemności, a straty mocy wyznaczone są analogicznie jak w przypadku mostka Maxwella. Mostek Andersona (rys. 9) ma dwie kolejne gałęzie CE oraz DE, w których umieszczone są rezystor R_5 o regulowanej rezystancji oraz kondensator C_6 . Mostek Andersona doprowadza się do stanu równowagi poprzez zmianę wartości dwóch rezystorów, a równanie stanu równowagi można uzyskać obliczeniowo poprzez

transfigurację trójkąta impedancji w gwiazdę. Straty mocy oblicza się identycznie jak w mostku Maxwella.

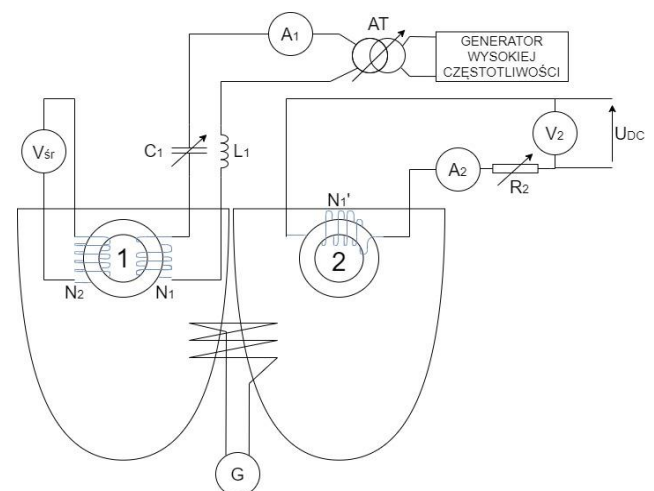


Rys.9. Mostek Andersona

Metody mostkowe znajdują zastosowanie w badaniu próbek materiałów ferromagnetycznych w polach o częstotliwości do 20 kHz. Podstawową wadą metod mostkowych jest wpływ sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych pochodzących od elementów układu pomiarowego. Przy wyższych częstotliwościach na wynik pomiaru negatywnie wpływają także indukcyjności szcawkowe rezystorów znajdujących się w mostku pomiarowym. Błąd pomiaru przy wyznaczaniu parametrów ferromagnetyków wynosi około 5%.

Metoda kalorymetryczna

Do pomiaru strat mocy próbki materiału magnetycznie miękkiego metodą kalorymetryczną wykorzystuje się pomiar wydzielanego ciepła podczas magnesowania badanej próbki. Metodę wykorzystuje się do pól magnetycznych o wysokiej częstotliwości, do 100 kHz. Model bazujący na metodzie kalorymetrycznej może być skonstruowany za pomocą kalorymetru różnicowego i dwóch naczyń Dewara z naftą oraz dwóch jednakowych badanych próbek (rys. 10).



Rys.10. Układ do pomiaru strat mocy metodą kalorymetryczną

W jednym naczyniu umieszcza się próbkę nr 1 z nawiniętymi dwoma uzwojeniami. Uzwojenie pierwotne N_1 połączone jest w szereg z kondensatorem C_1 i cewką L_1 , pełniącymi rolę filtra wyższych harmonicznym w przypadku odkształconego napięcia zasilania. Do uzwojenia wtórnego N_2 podłącza się woltomierz wartości średniej V_{sr} , którego wskazanie jest proporcjonalne do wartości indukcji magnetycznej w pierwszej próbce. W drugim naczyniu umieszcza się drugą, taką samą próbkę z nawiniętym pojedynczym uzwojeniem N_1' i za pomocą galwanometru G ustala się różnicę temperatur występującą w obu naczyniach. Pomiar napięcia woltomierzem V_2 oraz pomiar prądu stałego amperomierzem A_2 umożliwia obliczenie wartości strat mocy wydzielonych w drugiej próbce, które równe są stratom mocy wydzielonym w próbce pierwszej.

Podsumowanie

Zagadnienia ograniczania strat mocy w urządzeniach elektroenergetycznych, takich jak np. transformatory, oraz związane z tym sposoby ich wyznaczania, są bardzo istotne ze względu na ich szerokie zastosowanie w przemyśle. Niniejsza praca ma na celu zebranie w jednym miejscu i dokonanie przeglądu kilku wybranych metod wyznaczania strat mocy wydzielanych w materiałach ferromagnetycznych.

Artykuł przedstawia zarówno metody najczęściej stosowane w praktyce, takie jak metoda watomierzowa z wykorzystaniem aparatu Epsteina czy metoda oscyloskopowa, jak również szereg innych metod badawczych i eksperymentalnych, wykorzystujących alternatywne sposoby wyznaczania strat mocy czynnej, jak w metoda kalorymetryczna czy kompensacyjna. Ponadto współcześnie do akwizycji danych powszechnie korzysta się z komputerowych systemów pomiarowych złożonych z oprogramowania oraz karty pomiarowej, zapewniającej wysoką dokładność i czułość. Szacuje się, że w nieodległej przyszłości możliwym stanie się przeprowadzenie pomiarów na próbce o bardzo małej masie (w aparacie Epsteina są to cztery paski, w próbce pierścieniowej jest to jeden zwój) oraz o różnych wymiarach i kształtach [15]. Wymagane jednak będzie jednoznaczne określenie w odpowiednich normach i przepisach wymiarów, masy i kształtów odpowiednich próbek.

Autorzy: dr hab. inż. Sebastian Berhausen, prof. PŚ, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: sebastian.berhausen@polsl.pl; mgr. inż. Krzysztof Czajka, PGE Energetyka Kolejowa S.A., ul. Kamienna 14, 31-403 Kraków, E-mail: krzysztof_czajka@gkpge.pl.

LITERATURA

- [1] Tumański S.: Modern methods of electrical steel testing – a review, *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2021), nr 3, 162-167.
- [2] Tumański S., Bakoń T.: Measuring for two-dimensional testing of electrical steel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001-02, Vol. 223 (3), 315-325.
- [3] Bajorek J., Gaworska-Koniarek D., Nowak J.: Pomiar stratności próbek blach elektrotechnicznych w obszarze nasycenia magnetycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 6, 125-127.
- [4] Gmyrek Z.: Modele matematyczne i metody wyznaczania strat w ferromagnetykach miękkich pracujących w warunkach pola przemiennego i obrotowego, *Zeszyty Naukowe WSIInf*, 8 (2009), nr 2.
- [5] Stachowiak D., Idziak P.: Badanie właściwości magnetycznych materiałów magnetostrykcyjnych i stali konstrukcyjnych, *Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 85 (2016), 95-106.
- [6] Strzałka K.: Analiza możliwości zmniejszania strat w transformatorach rozdzielczych, *Elektrotechnika i Elektronika*, 25 (2006), Zeszyt 1.
- [7] Derlecki S., Kuśmierk Z., Dems M., Szulakowski J.: Właściwości materiałów magnetycznych i ich wpływ na konstrukcję maszyn elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 4.
- [8] Lerch T., Rad M., Rams W.: Single sheet tester for measuring core losses with novel adaptive algorithm of waveform, *Archives of Electrical Engineering*, 71 (2022), No. 4, 851–864.
- [9] Pluta W., Sowiński M.: Warunki pomiaru własności magnetycznych rdzeni ferromagnetycznych metodą watomierzową, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 1, 217-220.
- [10] Kolasa J., Bajorek J.: Czynniki wpływające na niepewność wyznaczenia właściwości magnetycznych blach elektrotechnicznych za pomocą aparatu Epsteina, *Przegląd Elektrotechniczny*, 83 (2007), nr 1.
- [11] Napieralska-Łuszczak E., Komeza K.: Modelowanie pola elektromagnetycznego w rdzeniach anizotropowych, wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2012.
- [12] Sievert J., Belgrand T., Fox D., Guo X., Kochmann T., Lyke R., Wang C., Zhou X.: New Data on the Epstein to Single Sheet Tester Relationship, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 7.
- [13] Lerch T., Rad M., Rams W.: Układ i program do badania charakterystyki magnetycznej i stratności blach (SST-H), *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, 1 (2021).
- [14] Kuryłowicz J.: Badania materiałów magnetycznych, wyd. WNT, Warszawa 1962.
- [15] Derlecki S.: Charakterystyka wpływu metody i rodzaju próbki na wynik badań materiałów magnetycznych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, 98 (2001), 229-235.