

Ćwiczenie 13

Wyznaczanie przenikalności magnetycznej i krzywej histerezy

13.1. Zasada ćwiczenia

W uzwojeniu, umieszczonym na żelaznym lub stalowym rdzeniu, wywołuje się przepływ prądu o stopniowo zmienianej wartości oraz kierunku i mierzy indukcję pola magnetycznego w szczelinie rdzenia. Wyznacza się pętlę histerezy materiału rdzenia i jego przenikalność magnetyczną.

13.2. Wiadomości teoretyczne

Pole magnetyczne opisują dwa wektory: wektor \vec{H} natężenia pola magnetycznego, oraz wektor \vec{B} indukcji pola magnetycznego. Jednostką natężenia pola magnetycznego jest amper na metr, $[H] = \text{A/m}$, a jednostką indukcji pola magnetycznego jest tesla, $[B] = \text{T} = \text{V}\cdot\text{s/m}^2$. Dla ośrodka materialnego związek między wektorami \vec{B} i \vec{H} ma postać:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad (13.1)$$

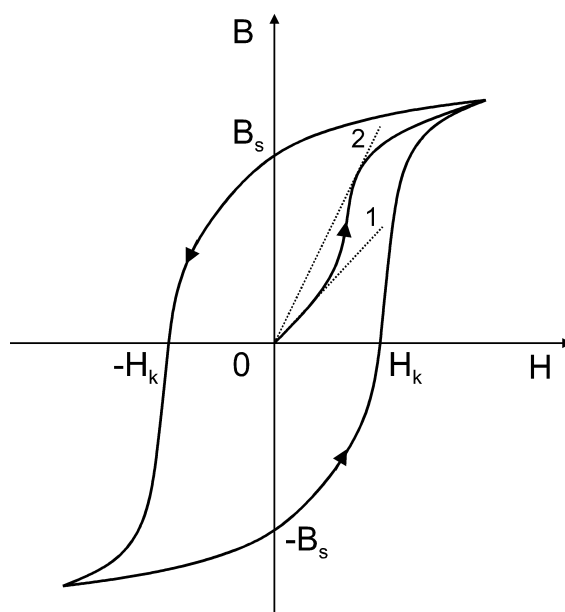
gdzie współczynnik $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ nazywa się przenikalnością magnetyczną próżni, natomiast bezwymiarowy współczynnik μ_r jest zwany względną przenikalnością magnetyczną ośrodka i charakteryzuje jego własności magnetyczne.

Zależnie od wartości względnej przenikalności μ_r , dzielimy substancje na trzy grupy:

1. substancje diamagnetyczne, dla których μ_r jest nieznacznie mniejsza od jedności,
2. substancje paramagnetyczne, dla których μ_r jest nieznacznie większa od jedności,
3. substancje ferromagnetyczne, dla których μ_r jest dużo (kilkadziesiąt tysięcy razy) większa od jedności.

Do ciał ferromagnetycznych należą żelazo, kobalt, nikiel i wiele stopów.

W przypadku ferromagnetyków związek między wartościami H i B nie jest, w odróżnieniu od pozostałych grup substancji, ani liniowy ani nawet jednoznaczny. Jeżeli nienamagnesowaną próbkę ferromagnetyka namagnesujemy wytwarzając w niej pole H , następnie obniżymy natężenie pola przez wartość zerową do $-H$ (zmieniając zwrot pola na przeciwny) i znów przez wartość zerową podniesimy natężenie pola z powrotem do wartości H , otrzymamy krzywą zamkniętą pokazaną na rys. 13.1, którą nazywamy krzywą lub pętlą histerezy. Wartość H_k natężenia pola, dla której indukcja



Rysunek 13.1. Krzywa histerezy ferromagnetyka

pola $B = 0$, nazywamy koercją, a wartość B_s indukcji pola, przy której natężenie pola $H = 0$, nazywamy pozostałością magnetyczną. Ze względu na szerokość pętli histerezy materiały ferromagnetyczne dzielimy na magnetycznie twarde — o dużej koercji i magnetycznie miękkie — o małej koercji.

Względna przenikalność magnetyczna ferromagnetyków zależy od natężenia pola magnetycznego oraz „historii magnetycznej” próbki i nie jest jednoznacznie określona. W praktyce duże znaczenie ma przenikalność początkowa w punkcie $H = 0$:

$$\mu_{r,p} = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}, \quad (13.2)$$

odpowiadająca prostej 1 na rys. 13.1, oraz przenikalność maksymalna:

$$\mu_{r,max} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{B}{H} \right)_{max}, \quad (13.3)$$

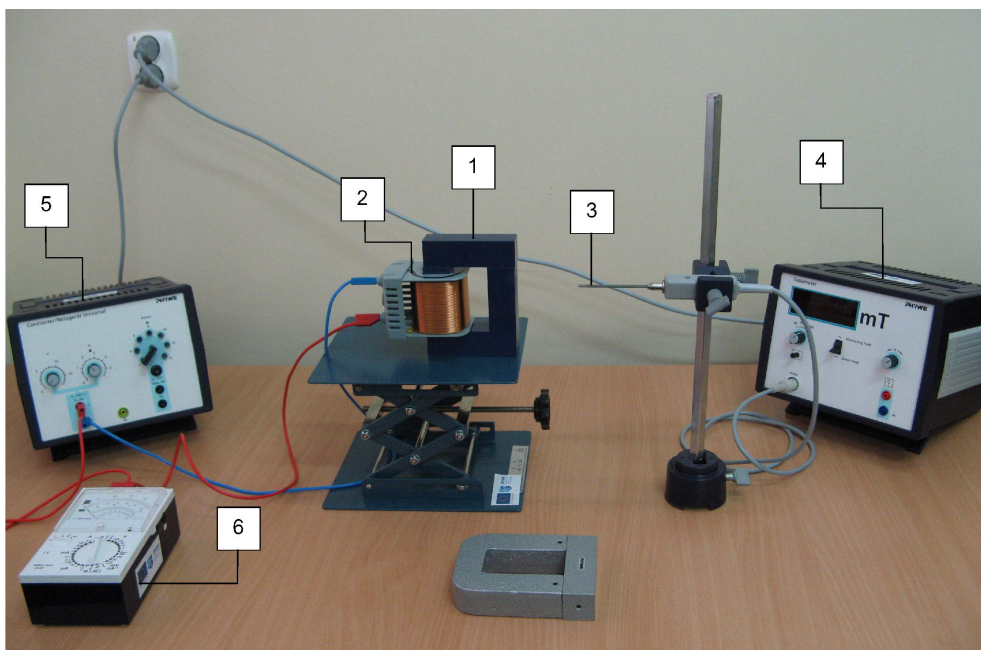
odpowiadająca prostej 2 na rys. 13.1.

W doświadczeniu pole magnetyczne w ferromagnetycznym rdzeniu wytwarza się przy pomocy nałożonej na rdzeń cewki z prądem. Uważając cewkę za długą (o długości znacznie większej od jej poprzecznych rozmiarów), natężenie pola magnetycznego wewnątrz cewki można w przybliżeniu wyrazić wzorem:

$$H = \frac{nI}{l}, \quad (13.4)$$

gdzie n jest liczbą zwojów cewki, I — natężeniem prądu a l — długością cewki.

13.3. Aparatura pomiarowa



Rysunek 13.2. Urządzenie do badania ferromagnetyków. 1 — rdzeń, 2 — cewka, 3 — sonda teslomierza, 4 — miernik i zasilacz teslomierza, 5 — zasilacz cewki, 6 — miernik uniwersalny

Stosowane w ćwiczeniu urządzenie pomiarowe jest pokazane na rys. 13.2. Badany ferromagnetyk składa się z rdzenia w kształcie litery „U”, zamkniętego drugim, prostym rdzeniem. Na pierwszy rdzeń nałożona jest cewka wytwarzająca pole magnetyczne. Natężenie prądu w cewce mierzy się miernikiem uniwersalnym, a indukcję pola magnetycznego w szczelinie między rdzeniami rejestruje się teslomierzem. Do dyspozycji są dwa rdzenie — stalowy i żelazny.

Przy pomiarach ogranicznik maksymalnego natężenia prądu zasilacza należy ustawić na 2 A. Ponieważ cewka z rdzeniem ma dużą indukcyjność, łączenie lub rozłączanie obwodu może być wykonywane tylko po stopniowym obniżeniu natężenia prądu w obwodzie do zera. Również zamykająca rdzeń zwora może być otwierana lub zamykana jedynie po zmniejszeniu do zera natężenia płynącego prądu. Inaczej w obwodzie nastąpi niebezpieczny przepływ indukowanego prądu o dużym natężeniu.

13.4. Zadania

Wyznaczyć krzywą histerezy dla stali i żelaza i określić wielkości, charakteryzujące magnetyczne własności tych materiałów.

13.5. Przebieg pomiarów i opracowanie wyników

Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów należy rozmagnesować badany rdzeń. W tym celu połączyć szeregowo wyjście zmiennego napięcia zasilacza z cewką i miernikiem uniwersalnym, ustawionym na pomiar zmiennego natężenia prądu. Przełączając zworkę zasilacza, stopniowo obniżać jego napięcie od początkowej wartości $U_z = 8 \text{ V}$ do 2 V do końcowej wartości $U_z = 2 \text{ V}$, co powoduje odpowiednie zmniejszenie natężenia prądu w cewce. Początkowa wartość natężenia prądu powinna być bliska maksymalnej dopuszczalnej wartości, $I = 2 \text{ A}$.

Po rozmagnesowaniu rdzenia połączyć obwód z wyjściem stałego napięcia zasilacza i przełączyć miernik na pomiar stałego natężenia prądu. Zdjąć rurkę, zabezpieczającą końcówkę teslomierza i ostrożnie umieścić ją w szczelinie między rdzeniami. Wyznaczyć zależność indukcji B pola magnetycznego w rdzeniu od natężenia prądu I , zmieniając stopniowo natężenie prądu od zera do wartości maksymalnej $I = 2 \text{ A}$ i z powrotem do zera, a następnie zmieniając kierunek przepływu prądu przez zamianę przewodów włączonych do gniazdek zasilacza. Ze wzoru (13.4) obliczyć wartości natężenia pola magnetycznego H , odpowiadające stosownym w pomiarach wartościom I . Długość stosowanej w pomiarach cewki wynosi $l = 0,063 \text{ m}$, a liczba jej zwojów $n = 600$. Zapisać w tabelce wartości I , H i B i oszacować ich niepewności, S_I , S_H i S_B . Narysować krzywą histerezy, sporządzając wykres zależności $B - H$. Wyznaczyć koercję H_k i pozostałość magnetyczną B_s badanego materiału. W celu określenia względnej przenikalności początkowej $\mu_{r,p}$ i maksymalnej $\mu_{r,max}$ narysować na wykresie odpowiadające im proste 1 i 2 (rys. 13.1) i obliczyć obie wielkości ze wzoru:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (13.5)$$

gdzie wartości B i H odnoszą się do dowolnie wybranego punktu prostej 1 lub 2. Oszacować graficznie niepewności wyznaczonych wielkości.

Opisane pomiary i ich opracowanie przeprowadzić dla obu rdzeni — stalowego i żelaznego. Skomentować różnice otrzymanych wyników.

13.6. Wymagane wiadomości

1. Elementarne wiadomości o ferromagnetyzmie — momenty magnetyczne atomów, siły wymienne, temperatura Curie, struktura domenowa ferromagnetyka, procesy zachodzące podczas jego magnesowania i rozmagnesowywania.
2. Przyczyny stosowania do magnesów trwałych materiałów twardych magnetycznie, a do rdzeni cewek, transformatorów, itp. materiałów miękkich magnetycznie.
3. Pole magnetyczne przewodników z prądem — prawo Ampère'a.
4. Wyprowadzenie wzoru (13.4), określającego natężenie pola magnetycznego długiej cewki, na podstawie prawa Ampère'a.

13.7. Literatura

- [1] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker — Podstawy fizyki, t. 3, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
- [2] Cz. Bobrowski — Fizyka — krótki kurs, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.