

E102. Badanie histerezy magnetycznej

Cele ćwiczenia: Wyznaczenia przenikalności magnetycznej próżni μ_0 na podstawie wykresu $B(H)$ dla cewek pomiarowych bez rdzenia ferromagnetycznego; wyznaczenie zależności $B(H)$ dla próbek i porównanie pracy traconej na histerezę w jednym obiegu napięcia zmiennego w zależności od materiału rdzenia transformatora pomiarowego (stal, żelazo, ferryt); wyznaczenia koercji H_c ferromagnetyków i określenie namagnesowania szczątkowego B_r próbek.

Literatura: R. P. Feynmana wykłady z fizyki, tom II cz. 2
H. Szydłowski Pracownia Fizyczna 1
D. Halliday, R. Resnick, Fizyka, tom II
Pomiary fizyczne za pomocą komputera pod red. H. Szydłowskiego

1. Wprowadzenie

Ze względu na zachowanie się ciał makroskopowych w polu magnetycznym możemy je podzielić na trzy grupy: diamagnetyki (słabo odpychane przez magnes), paramagnetyki (słabo przyciągane przez magnes) oraz ferromagnetyki (silnie przyciągane przez magnes).

Diamagnetyzm występuje we wszystkich ciałach, ale może być kompensowany przez występowanie silniejszego zjawiska paramagnetyzmu lub ferromagnetyzmu. Polega na częściowym ekranowaniu pola magnetycznego wskutek ruchu elektronów w atomach, indukowanego przez pole magnetyczne. Paramagnetyzm występuje w ciałach, które posiadają trwałe dipolowe momenty magnetyczne atomów lub cząsteczek, zmieniające swoją orientację pod wpływem pola magnetycznego. Jeśli momenty te silnie na siebie oddziałują to ciało staje się ferromagnetykiem, gdyż powstają zlokalizowane uporządkowane struktury (zwane domenami), które posiadają jeden kierunek namagnesowania. Pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego początkowo następuje zwiększanie się objętości domen, a następnie rotacja wektora namagnesowania w domenach. Stan nasycenia występuje, gdy całe ciało jest jednorodnie namagnesowane. Proces rotacji wektora namagnesowania w domenach i przesunięcia granic domen związany jest ze stratami energii – wynikiem tego jest zjawisko histerezy magnetycznej, czyli niejednoznaczności zależności namagnesowania ferromagnetyka od zewnętrznego pola magnesującego. Straty te można podzielić na straty histerezy, określone przez pole powierzchni pętli histerezy, i straty na prądy wirowe, proporcjonalne do przewodnictwa elektrycznego próbki.

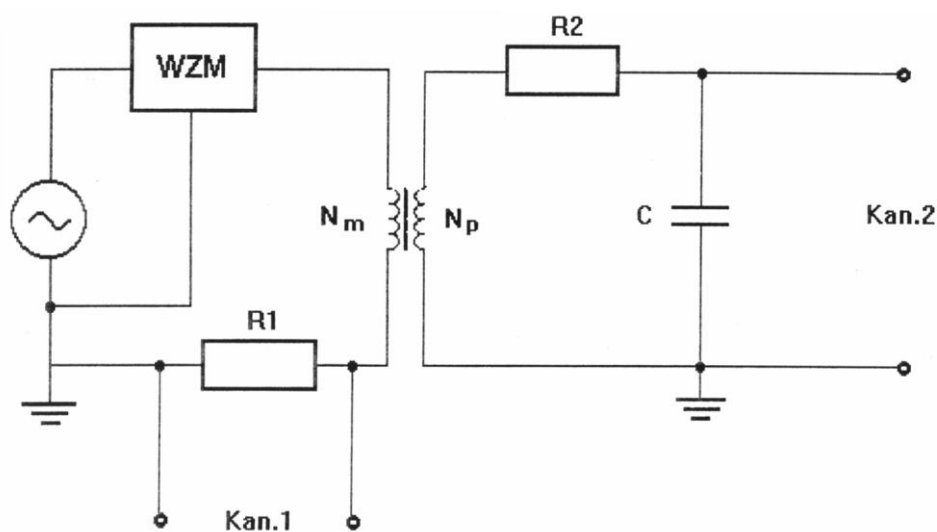
Wypadkowa indukcja magnetyczna B w ośrodku jest związana z natężeniem zewnętrznego pola magnetycznego H za pomocą następującej zależności:

$$B = \mu_r \mu_0 H, \quad (1)$$

gdzie μ_r jest względną przenikalnością magnetyczną a μ_0 jest przenikalnością magnetyczną próżni i wynosi $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ T m / A}$. Dla diamagnetyków $\mu_r < 1$, dla paramagnetyków $\mu_r > 1$ a dla ferromagnetyków $\mu_r \gg 1$. Dla tych ostatnich μ_r zależy od natężenia pola magnetycznego i od „historii układu” (jako namagnesowanie występowało przed przyłożeniem zewnętrznego pola), tak więc zależność $B(H)$ ma w związku z tym postać krzywej histerezy. Charakterystycznymi parametrami ferromagnetyków jest tzw. indukcja szczytkowa B_r , jaka występuje przy braku zewnętrznego pola magnetycznego ($B_r = B(H=0)$), oraz tzw. koercja H_r , czyli wartość pola magnetycznego potrzebna do sprowadzenia indukcji B do wartości 0.

Materiały ferromagnetyczne można podzielić na twarde (np. niektóre stale), w których występują duże straty histerezowe i duże wartości koercji (wykonuje się z nich np. magnesy trwałe) oraz miękkie, o mniejszych wartościach koercji (np. ferryty). Ferryty są materiałami posiadającymi dużą wartość przenikalności magnetycznej przy małych stratach na prądy wirowe. Stosuje się je szeroko np. jako rdzenie transformatorów i anteny promieniowania.

2. Aparatura



Rysunek 1. Schemat układu pomiarowego

Podstawową część układu pomiarowego (rys. 1) stanowi transformator złożony z dwóch współosiowych cewek z wymiennym rdzeniem. Cewka magnesująca zasilana jest prądem zmiennym z generatora o częstotliwości kilku Hz. Natężenie prądu jest regulowane przez wzmacniacz WZM. Pomiar natężenia prądu zasilającego umożliwia opornik R_1 (połączony szeregowo z cewką magnesującą), na którym mierzony jest spadek napięcia U . Natężenie pola magnetycznego H w cewce magnesującej jest proporcjonalne do natężenia prądu zasilającego, a więc do spadku napięcia U :

$$H = \frac{N_m U}{R_1 d w_1}, \quad (2)$$

gdzie N_m oznacza liczbę zwojów cewki magnesującej, d – jej długość, a w_1 – wartość wzmocnienia napięcia U przed przesłaniem go do analogowego kanału nr 1 konsoli pomiarowej.

Z kolei napięcie indukowane w cewce pomiarowej, U_c , jest proporcjonalne, zgodnie z prawem Faraday'a, do szybkości zmian w czasie strumienia indukcji magnetycznej B . Sygnał z cewki pomiarowej jest całkowany przez układ RC składający się z opornika o oporze R_2 i kondensatora o pojemności C . Indukcja magnetyczna B zależy od napięcia na kondensatorze U_c w następujący sposób:

$$B = \frac{U_c R_2 C}{N_p S w_2}, \quad (3)$$

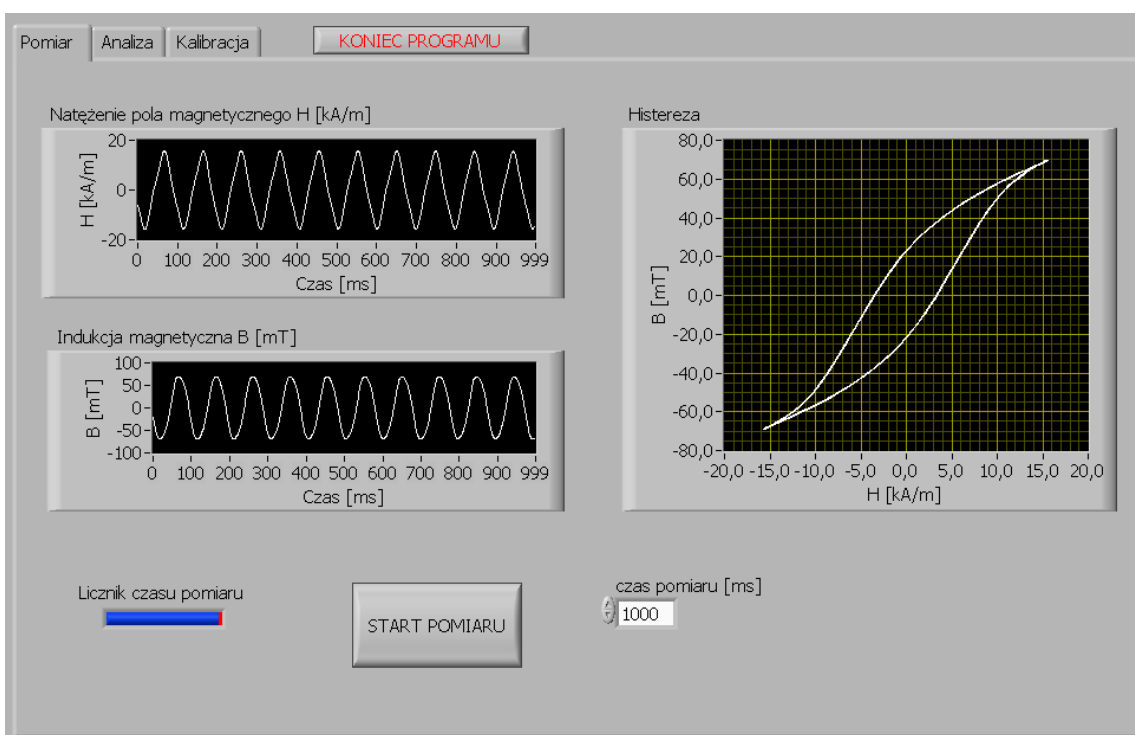
gdzie N_p oznacza liczbę zwojów cewki pomiarowej, S jest powierzchnią przekroju cewki, a w_2 – wartością wzmocnienia napięcia U_c przed przesłaniem go do analogowego kanału nr 2 konsoli pomiarowej.

Napięcia U i U_c zbierane są przez odpowiednio kanał 1 i 2 konsoli pomiarowej, a następnie za pomocą karty pomiarowej UIB przetwarzane w komputerze na postać cyfrową. Ich zmiany w czasie rejestrowane są przez program „Histereza” i, dzięki odpowiedniej kalibracji opartej o wzory (2) i (3), wartości zmierzonych napięć przeliczane są na natężenia pola magnetycznego H i indukcji magnetycznej B .

3. Pomiar i opracowanie wyników

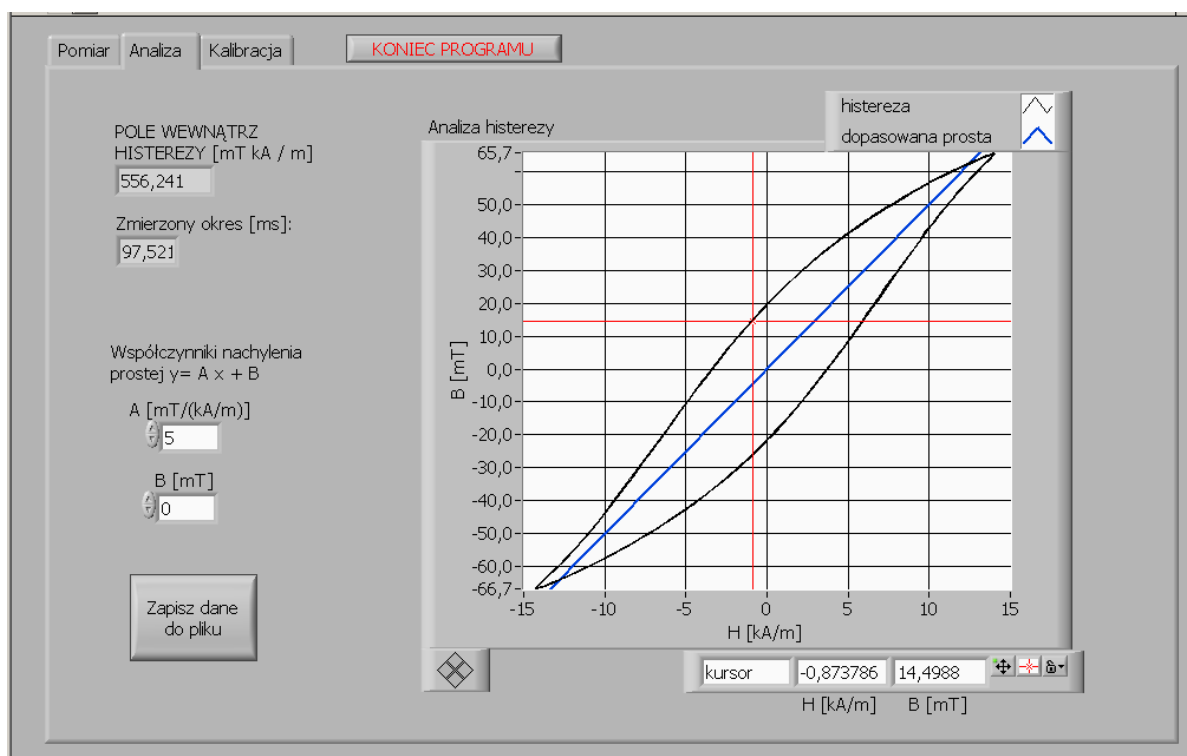
Do wykonywania pomiaru zależności w czasie $B(t)$ i $H(t)$ oraz wstępnej analizy wyników służy program „Histereza” napisany w środowisku LabView. Po sprawdzeniu połączeń elektrycznych należy włączyć do sieci wzmacniacze sygnałów na kanałach 1 i 2, włączyć generator prądu i ustalić częstotliwość sygnału sinusoidalnego rzędu kilku Hz (10 lub 20 Hz) oraz włączyć wzmacniacz WZM. Ten ostatni należy ustawić tak, aby otrzymać dostateczną amplitudę mierzonych sygnałów (w przedziale 1,5 do 2,0 A). Przed przystąpieniem do pomiarów należy sprawdzić, czy parametry układu pomiarowego odpowiadają tym, które są podane w zakładce „Kalibracja” programu „Histereza” (w szczególności ustawienia wzmocnień w_1 i w_2) – w przeciwnym wypadku przeliczenie napięć na wartości H i B będzie błędne.

Po umieszczeniu wewnątrz transformatora badanego materiału rozpoczynamy pomiar wciskając przycisk **Start Pomiaru** w zakładce „Pomiar”. Komputer zacznie wówczas zbierać dane z kanałów 1 i 2 przez ustalony w programie czas trwania pomiaru. W trakcie akumulowania danych wyświetlany jest poziomy wskaźnik czasu trwania pomiaru, a po ich zakończeniu odświeżane są wykresy $H(t)$ i $B(t)$, przedstawiające periodyczne zmiany w czasie natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej, oraz wykres $B(H)$. Przykładowy wygląd zakładki „Pomiar” programu po poprawnym zmierzeniu przedstawia rys. 2.



Rysunek 2. Zakładka „Pomiar” programu „Histereza”

Wykres $B(H)$ odświeżany jest również w zakładce „Analiza”, w której dokonuje się wstępnej analizy wyników. Program automatycznie oblicza pole powierzchni pętli histerezy (histereza przedstawiona jest kolorem czarnym), które określa straty energetyczne na magnesowanie, będące ważnym parametrem własności ferromagnetyków. Pole uśredniane jest dla pełnej liczby okresów przebiegów $H(t)$ i $B(t)$. Okres ten jest wyznaczany automatycznie i jego wartość podana jest w polu „Zmierzony okres [ms]:”. Jeśli wyznaczony okres jest inny niż wynika to z ustawionej częstotliwości generatora (np. dla częstotliwości 10 Hz okres powinien wynosić ok. 100 ms), to wówczas obliczone pole jest niepoprawne i należy powtórzyć pomiar. Wymiarem pola powierzchni jest iloczyn energii i objętości.

**Rysunek 3.** Zakładka „Analiza” programu „Histereza”

Do wyznaczenia kolejnych parametrów – indukcji szczątkowej B_r i koercji H_c – służy kursor (kolor czerwony) przesuwany myszą (trzymając wciśnięty lewy przycisk), którego współrzędne x i y wyświetlone są pod wykresem. Jeśli na wykresie początkowo nie widać kursora, to należy wprowadzić odpowiednie wartości tych współrzędnych tak, aby pojawił się on na wykresie (skala na wykresie jest automatycznie dopasowywana do zmierzonej histerezy $B(H)$). Jeśli krzywa histerezy jest symetryczna względem początku układu

współrzędnych, to wartości B_r i H_c są współrzędnymi punktów przecięcia histerezy z osiami x i y . Wreszcie, dla liniowych zależności $B(H)$, dla których nie występuje krzywa histerezy, można dopasować funkcję liniową w postaci $y = A x + B$ (linia niebieska), zmieniając odpowiednio wartości parametrów A i B . Skokową zmianę o wartość 0,1 uzyskuje się klikając na strzałki z lewej strony odpowiednich pól. Wartość nachylenia prostej A jest równa współczynnikowi $\mu_r \mu_0$ (patrz wzór (1)). W szczególności, dla pomiarów z pustym transformatorem ($\mu_r=1$) wartość współczynnika A należy porównać z tablicową wartością przenikalności magnetycznej próżni μ_0 . Wartości badanych parametrów (poła powierzchni pętli histerezy, indukcji szczątkowej B_r , koercji H_c oraz współczynników A i B) należy uśrednić z kilku niezależnych pomiarów. Przykładowy wygląd zakładki „Analiza” przedstawia rys. 3.

Do opracowania wyników można skorzystać z trzech możliwości wyeksportowania zmierzonych danych:

- po kliknięciu przycisku **Zapisz dane do pliku** należy podać nazwę pliku, do którego będzie zapisana zmierzona zależność $B(H)$ w postaci tekstowej (dwie kolumny danych), którą następnie można przetwarzać za pomocą innego programu (np. Microsoft Excel);
- uproszczony, czarno-biały wykres można skopiować do schowka bądź do pliku w postaci rysunku BMP lub EMF klikając prawym przyciskiem na wykresie i wybierając z menu pozycję **Export Simplified Image...**
- można skopiować zawartość całego ekranu do schowka (po wciśnięciu klawisza **Print Screen**), który można następnie wkleić bezpośrednio np. do dokumentu Word'a; do przycięcia obrazu i zapisania go w skompresowanej postaci można również skorzystać z zainstalowanej aplikacji IrfanView.