

E10. BADANIE HISTEREZY MAGNETYCZNEJ

część teoretyczną opracowała: Bożena Janowska-Dmoch

część eksperymentalną opracował: Marek Pękała

Własności magnetyczne substancji są wynikiem ruchu elektronów wokół jąder i ich ruchu obrotowego wokół własnej osi. Z ruchem orbitalnym elektronów jest związany dipol magnetyczny opisany wektorem orbitalnego momentu magnetycznego, zaś z ruchem obrotowym dipol magnetyczny opisany wektorem spinowego momentu magnetycznego. Momenty te sumują się wektorowo, dając wypadkowy moment magnetyczny atomów lub jonów danej substancji.

Substancje, których atomy lub jony mają zapełnione powłoki elektronowe, czyli o konfiguracji gazów szlachetnych (VIII grupa: He, Ne, Ar...), mają całkowity moment magnetyczny (spinowy i orbitalny) równy zero i nazywamy je **diamagnetykami**.

Pole magnetyczne działające siłą Lorentza na poruszające się elektrony zakłóca ruch elektronów. Ponieważ zmienia się strumień pola magnetycznego objęty przez orbity elektronów, zmienia się częstość kołowa (Larmora) każdego elektronu i pojawia się wówczas indukowany moment magnetyczny antyrównoległy do linii sił pola magnetycznego i dlatego namagnesowanie diamagnetyka maleje proporcjonalnie do natężenia pola magnetycznego. Jest to tzw. **efekt diamagnetyczny**. Zjawisko to występuje we wszystkich ośrodkach. Indukowany moment magnetyczny jest niewielki i zwykle maskowany przez silniejsze efekty magnetyczne. Diamagnetyki są wypychane z pola magnetycznego.

Substancje, których atomy lub jony poza zapełnioną powłoką gazu szlachetnego, mają nieparzystą liczbę tzw. elektronów niesparowanych, posiadają trwałe momenty magnetyczne i są **paramagnetykami** lub **ferromagnetykami**, które są wciągane w pole magnetyczne.

Dipole magnetyczne w paramagnetykach oddziałują ze sobą słabo i przy braku zewnętrznego pola magnetycznego ich orientacja przestrzenna jest przypadkowa, a moment magnetyczny próbki jest bliski zero. Pole magnetyczne, działające momentem siły porządkuje dipole magnetyczne ustawiając je równoległe do linii sił pola i wywołuje niewielki moment magnetyczny. Dlatego w stałej temperaturze namagnesowanie paramagnetyka rośnie proporcjonalnie do natężenia pola. Proces ten silnie zakłócają ruchy termiczne.

Gdy paramagnetyk zostanie ochłodzony poniżej krytycznej temperatury Curie przechodzi do fazy ferromagnetycznej. W ferromagnetykach kwantowe, magnetyczne oddziaływania wymienne między momentami magnetycznymi jonów stają się silniejsze od energii drgań cieplnych $k_B T$ (k_B – stała Boltzmana), co prowadzi do spontanicznego uporządkowania dipoli magnetycznych nawet przy braku zewnętrznego pola magnetycznego. Zgodne ułożenie dipoli magnetycznych w pewnym obszarze o rozmiarach μm nazywamy domeną magnetyczną. W normalnych warunkach próbka składa się z wielu domen. Poszczególne domeny są względem siebie zorientowane chaotycznie i choć dipole magnetyczne w każdej domenie są całkowicie uporządkowane, to kryształ jako całość może mieć zerowe, bądź małe namagnesowanie. Dopiero zewnętrzne pole magnetyczne porządkuje domeny i ustawia momenty magnetyczne równoległe do linii sił pola, a wtedy próbka ferromagnetyka uzyskuje znaczny, wypadkowy moment magnetyczny skierowany wzdłuż działającego pola. Wyłączenie pola zazwyczaj nie powoduje powrotu próbki do pierwotnego stanu rozmagnesowania i próbka zachowuje pewien stopień uporządkowania magnetycznego.

Miarą namagnesowania (magnetyzacji) próbki jest długość wektora namagnesowania \vec{M} zdefiniowanego jako moment magnetyczny jednostki objętości danej substancji, czyli

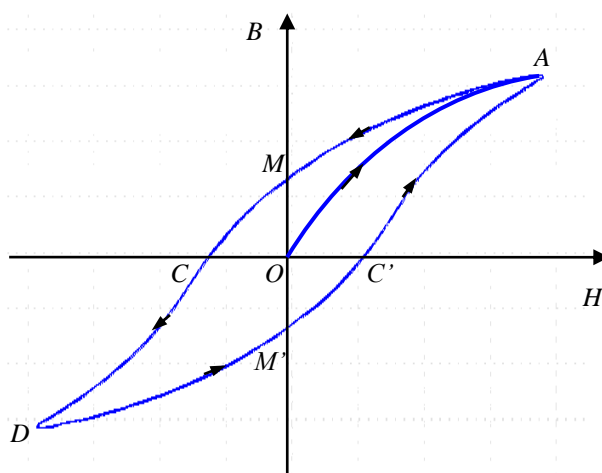
$$\vec{M} = \frac{1}{\Delta V} \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \vec{p}_m^i$$

gdzie \vec{p}_m^i jest momentem magnetycznym i -tego atomu lub jonu. W miarę wzrostu temperatury namagnesowanie ferromagnetyka maleje. Dla każdego ferromagnetyka istnieje charakterystyczna temperatura, zwana punktem Curie, w której traci on swe właściwości i staje się paramagnetykiem.

Namagnesowanie nie jest liniową funkcją natężenia pola magnetycznego.

W ferromagnetykach występuje zjawisko histerezy polegające na tym, że namagnesowanie próbki zależy nie tylko od natężenia pola magnetycznego H , ale również od jej poprzedniego namagnesowania, czyli od historii próbki.

Jeśli próbka była początkowo rozmagnesowana, to zwiększanie natężenia zewnętrznego pola magnetycznego powoduje magnesowanie się ferromagnetyka i wzrost indukcji B wewnątrz próbki przebiegający wzdłuż linii OA . Przy pewnym natężeniu pola (punkt A) wszystkie domeny są zorientowane wzdłuż pola. Stan ten nazywamy nasyceniem. Fragment OA nazywa się krzywą pierwotną. W miarę zmniejszania natężenia pola magnetycznego następuje stopniowe rozmagnesowywanie próbki, bowiem wskutek ruchów termicznych zmniejsza się uporządkowanie domen. Zachodzi ono po krzywej AM , leżącej powyżej OA .



Pętla histerezy magnetycznej

W zerowym polu próbka pozostaje namagnesowana. Indukcja wewnątrz niej jest różna od zera (odcinek OM) i jest nazywana **pozostałością magnetyczną** lub **remanencją B_R** . Po zmianie kierunku pola magnetycznego indukcja wewnątrz próbki stopniowo maleje. Natężenie pola, przy którym indukcja magnetyczna próbki spada do zera (odcinek OC) nazywamy **połem koercji H_C** . Zwiększając w dalszym ciągu natężenie pola powodujemy magnesowanie ferromagnetyka w przeciwnym kierunku, aż do osiągnięcia stanu nasycenia (punkt D). Podobne zmiany namagnesowania zachodzą, gdy natężenie pola H maleje do zera, a następnie zmieniając kierunek rośnie. Najpierw namagnesowanie próbki maleje. W chwili, gdy H jest równe zero indukcja w próbce ma tę samą co poprzednio wartość pozostałości magnetycznej B_R (odcinek OM'), ten sam kierunek, ale przeciwny zwrot. Wzrost natężenia pola do wartości H_C (odcinek OC') powoduje rozmagnesowanie ośrodka. Dalszy wzrost H powoduje ponowne nasycenie namagnesowania, czyli powrót do punktu A . Toteż gdy do ferromagnetyka przyłożymy zmienne pole magnetyczne, to indukcja magnetyczna wewnątrz próbki będzie się zmieniać po krzywej zamkniętej $AMCDM'C'A$, zwanej pętlą histerezy magnetycznej.

Pole powierzchni objęte pętlą histerezy jest równe pracy wykonanej przez pole H na dokonanie pełnego cyklu przemagnesowania jednostki objętości ferromagnetyka po krzywej zamkniętej $AMCDM'C'A$. Praca ta zamienia się w ciepło, charakteryzuje więc straty energii przy kolejnych przemagnesowaniach próbki.

Ferromagnetyki dzielimy na materiały **twarde** i **miękkie**. Materiały twarde mają szeroką pętlę histerezy o dużej wartości pola koercji i pozostałości magnetycznej tylko nieznacznie mniejszej od indukcji nasycenia. Toteż materiały twarde są doskonałymi magnesami trwałymi. Materiały miękkie mają wąską pętlę histerezy o małej koercji, zwykle poniżej 100 A/m. Wykorzystywane są do budowy elektromagnesów i rdzeni transformatorowych. Ferromagnetyki o własnościach pośrednich (półtwarde) są stosowane w dyskach komputerowych lub kartach magnetycznych.

Cel

Celem ćwiczenia jest zbadanie pętli histerezy dla trzech ferromagnetyków – stopu żelaza, stali transformatorowej i ferrytu przez:

- pomiary pola koercji w funkcji natężenia prądu;
- pomiary pozostałości magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego;
- pomiary indukcji nasycenia w funkcji natężenia pola magnetycznego.

Wymagania

Definicje i związki między wektorami: indukcji magnetycznej B , natężenia pola magnetycznego H i namagnesowania M . Przenikalność i podatność magnetyczna. Strumień indukcji magnetycznej.

Pole magnetyczne i jego wytwarzanie. Prawo Ampera i Biota – Savarta. Moment magnetyczny pętli z prądem i moment magnetyczny elektronu na orbicie. Moment siły pola magnetycznego działający na moment magnetyczny.

Własności magnetyczne materii, istota dia-, para- i ferromagnetyzmu. Zależność namagnesowania i przenikalności (podatności) magnetycznej od natężenia pola magnetycznego dla dia-, para- i ferromagnetyków.

Struktura domenowa ferromagnetyków, temperatura Curie, pętla histerezy ferromagnetycznej, ruchy domen, pozostałość magnetyczna i pole koercji. Prawo indukcji Faradaya, siła elektromotoryczna indukcji. Prawo Ohma i prawa Kirchhoffa. Układ całkujący.

Literatura

D. Halliday, R. Resnick, Fizyka, tom II, PWN

D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, tom III, PWN

M. Pękała, Eksperymentalne metody magnetochemii, Wyd. UW 2013

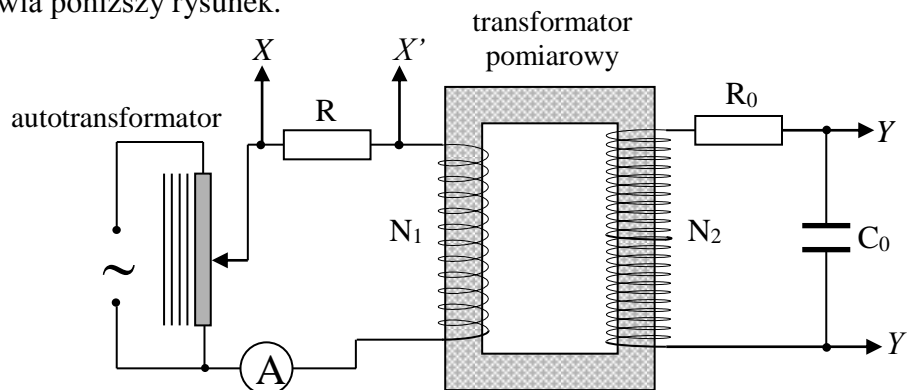
W. Bogusz, J. Garbarczyk, F.Krok, Podstawy fizyki, Oficyna Wydawnicza PW 1997

A. Morrish, Fizyczne podstawy magnetyzmu, PWN

K. Zboiński, Laboratorium z fizyki, Liber

Opis układu

Do badania zjawiska histerezy wykorzystano w ćwiczeniu układ, którego schemat przedstawia poniższy rysunek.



Schemat układu pomiarowego

Układ ten składa się z transformatora pomiarowego, którego uzwojenie pierwotne o N_1 zwojach jest zasilane poprzez autotransformator zmiennym napięciem sieci. Rdzeń transformatora stanowi ramka z badanego materiału ferromagnetycznego. Szeregowo z uzwojeniem pierwotnym jest połączony opór omowy R i amperomierz A . Prąd płynący w tym obwodzie wytwarza pole magnetyczne w ramce, którego natężenie H jest wprost

proporcjonalne do natężenia płynącego w obwodzie prądu. Spadek napięcia na oporze R , jest podany na poziome okładki oscyloskopu i przetwornika analogowo-cyfrowego sprzężonego z komputerem. Napięcie to jest proporcjonalne do natężenia prądu i jednocześnie do natężenia pola magnetycznego, dlatego też wychylenie plamki na ekranie w kierunku X jest proporcjonalne do natężenia pola magnetycznego.

Zgodnie z prawem indukcji Faradaya w uzwojeniu wtórnym o N_2 zwojach powstaje prąd indukcyjny jako rezultat zmian strumienia magnetycznego zachodzących w rdzeniu. Prąd indukcyjny płynie przez układ całkujący, składający się z opornika R_0 i kondensatora o pojemności C_0 . Napięcie zbierane z kondensatora jest proporcjonalne do indukcji magnetycznej B w ferromagnetyku i zostaje podane na płytki odchylenia pionowego oscyloskopu i przetwornika. Gdy oscyloskop pracuje w modzie XY na ekranie obserwujemy złożenie periodycznie zmieniających się napięć, napięcia proporcjonalnego do indukcji magnetycznej w kierunku Y i napięcia proporcjonalnego do natężenia pola magnetycznego w kierunku X , o charakterystycznym kształcie pętli histerezy.

Oprogramowanie komputera umożliwi mierzenie wybranych punktów histerezy bezpośrednio na ekranie za pomocą kursorów, drukowanie pętli histerezy dla różnych rdzeni lub zapisanie ich w pamięci.

Wprowadzenie wzorów

Przepływający przez uzwojenie pierwotne transformatora o N_1 zwojach prąd przemienny o natężeniu $I = I_0 \sin \omega t$ wytwarza w rdzeniu ferromagnetycznym zmienne pole magnetyczne o natężeniu

$$H = \frac{N_1 I}{l}$$

gdzie l jest długością uzwojenia pierwotnego.

Spadek napięcia na oporniku R jest wtedy równy:

$$U = RI = \frac{RHl}{N_1}$$

W naszym układzie doświadczalnym napięcie U jest podane na okładki odchylenia poziomego oscyloskopu XX' . Wychylenie wiązki elektronów w kierunku X na ekranie oscyloskopu (lub komputera) jest więc wprost proporcjonalne do natężenia pola H , w którym w danej chwili znajduje się badany rdzeń ferromagnetyczny.

Mierząc na ekranie odpowiednie odcinki **wzdłuż osi X** , czyli: X_{\max} równy współrzędnej X -owej punktu A (lub D) histerezy oraz X_c odpowiadający współrzędnej X -owej punktu C (lub C'), znajdziemy natężenia pól H_{\max} i H_c korzystając ze wzorów:

$$H_{\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{sk} \cdot N_1}{l} = A_X \cdot I_{sk}$$

$$H_c = H_{\max} \frac{X_c}{X_{\max}},$$

gdzie $I_0 = \sqrt{2} \cdot I_{sk}$ jest **amplitudą** prądu, I_{sk} jest natężeniem skutecznym wskazywanym przez

amperomierz, zaś $A_X = \frac{\sqrt{2} \cdot N_1}{l}$ określa czułość kanału „ X ”.

W takt zmian pola magnetycznego zmieniać się będzie strumień magnetyczny w rdzeniu. Zmienny strumień magnetyczny, zgodnie z prawem indukcji Faradaya, wytwarza w uzwojeniu wtórnym o N_2 zwojach siłę elektromotoryczną indukcji równą

$$\mathcal{E} = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}$$

gdzie S jest polem przekroju rdzenia, czyli pojawiające się na uzwojeniu wtórnym transformatora napięcie jest proporcjonalne do pochodnej $\frac{dB}{dt}$. Aby na płytce odchylenia pionowego YY' podać napięcie proporcjonalne do indukcji B zastosowano układ całkujący RC. Napięcie na kondensatorze C_0 jest równe

$$U_C = \frac{q}{C_0} = \frac{1}{C_0} \int I dt = \frac{1}{C_0} \int \frac{\mathcal{E}}{R_0} dt = -\frac{1}{R_0 C_0} N_2 S B$$

Indukcja pola magnetycznego w ferromagnetyku jest proporcjonalna do napięcia U_C występującego na kondensatorze C_0

$$B = \frac{R_0 C_0}{N_2 S} U_C.$$

Obserwowana na ekranie oscyloskopu (lub komputera) krzywa przedstawia zależność indukcji pola magnetycznego w rdzeniu ferromagnetycznym od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. Charakterystycznymi punktami tej krzywej są **indukcja resztkowa B_R** i **indukcja nasycenia B_{max}** . Indukcję resztkową ma ferromagnetyk w chwilach, gdy natężenie pola magnetycznego jest równe zero $H=0$. Z dokładnością do stałej jest ona równa pozostałości magnetycznej M_r , zwanej remanencją próbki

$$B_r = \mu_0 M_r \Big|_{H=0}$$

Na ekranie mierzymy odcinki Y_R i Y_{max} odpowiadające współrzędnym Y-owym punktów M i A histerezy. Napięcie w punkcie M , czyli U_{CM} , a także napięcie w punkcie A , czyli U_{Cmax} , można zapisać:

$$U_{CM} = n_y \cdot Y_R \quad U_{Cmax} = n_y \cdot Y_{max}$$

gdzie n_y jest aktualnie stosowanym dzielnikiem osi Y i wskazuje ile razy napięcie zbierane na kondensatorze zostało zmniejszone przed podaniem go na przetwornik. Wartość indukcji magnetycznej w interesujących nas punktach wyliczamy ze wzorów:

$$B_R = \frac{n_y \cdot Y_R \cdot R_0 \cdot C_0}{N_2 S} = A_Y \cdot Y_R$$

$$B_{max} = \frac{n_y \cdot Y_{max} \cdot R_0 \cdot C_0}{N_2 S} = A_Y \cdot Y_{max}$$

gdzie $A_Y = \frac{n_y R_0 C_0}{N_2 S}$ określa czułość kanału „Y”.

Przenikalność magnetyczna ferromagnetyka nie jest wielkością stałą, bo zależy od natężenia pola magnetycznego i w zmiennym polu jej wartość zmienia się cyklicznie w takt zmian pola magnetycznego. Jako wielkość charakteryzującą dany ferromagnetyk wprowadza się tzw. przenikalność w stanie nasycenia μ_{max} , zwaną także przenikalnością normalną

$$\mu_{\max} = \frac{B_{\max}}{\mu_0 H_{\max}}.$$



Wykonanie ćwiczenia

Wyniki wszystkich pomiarów muszą być zapisane w sprawozdaniu, opatrzone odpowiednimi jednostkami i podpisane przez asystenta.

Uwaga: włączenia napięcia zasilania i dobór parametrów układu zapewniających właściwy kształt pętli histerezy dokonuje asystent. Sugerowane natężenie prądu $\leq 150\text{mA}$.

- W gniazda płytki montażowej wsuwamy jeden z wybranych przez asystenta transformatorów pomiarowych. Dla TDK Toroidu dokonujemy zmiany w obwodzie patrz uwaga w punkcie d).
- Na kondensatorze dekadowym nastawiamy podaną w tabeli wartość pojemności C_0 odpowiednią dla danego transformatora.
- Na oporniku dekadowym nastawiamy podaną w tabeli wartość oporu R_0 odpowiednią dla danego transformatora.
- Na dzielniku przetwornika analogowo-cyfrowego ustawiamy odpowiednie dla wybranego transformatora dzielniki osi X i Y, czyli n_x i n_y . Potrzebne informacje umieszczone są w tabeli poniżej.
Uwaga: tylko w przypadku TDK Toroidu należy sygnał wyjściowy YY' podać na wejście wzmacniacza napięcia $\times 10$. Wyjście wzmacniacza należy podać na oś Y dzielnika przetwornika ustawionego w pozycji 1:1, a wtedy $n_y = 0,1$.
- Zapisujemy ustaloną dla danego rdzenia wartość natężenia prądu I_{sk} .
- Uruchamiamy komputer i otwieramy program PicoScope. Z menu programu wybieramy pozycję View i spośród możliwych opcji wybieramy New XY Scope. Maksymalizujemy ekran.
- Skręcamy pokrętko autotransformatora do zera i wyłączamy przyrząd wyłącznikiem. Przy wyłączonym autotransformatorze ustawiamy położenie plamki na środek ekranu (punkt o współrzędnych 1250mV; 1250mV), korzystając z pokręteł przesuwu umieszczonych na dzielniku przetwornika analogowo-cyfrowego.
- Włączamy autotransformator. Gałkę zmiany zakresów miernika uniwersalnego ustawiamy na zakres mA. Aby miernik mierzył prąd zmienny naciskamy trzeci, szary klawisz miernika. W okienku wyświetlacza pojawia się informacja – AC. Pokrętkiem autotransformatora ustawiamy na amperomierzu wartość natężenia prądu I_{sk} ustaloną wcześniej przez asystenta.
- Naciskamy przycisk **STOP** w lewym dolnym rogu ekranu. Pętla histerezy widoczna na ekranie zostaje zamrożona. Obraz można powiększyć naciskając mnożniki sygnału w każdym kanale (przejście z pozycji OFF na np. $\times 5$). Na ekranie dokonujemy pomiarów położenia istotnych punktów histerezy.

Pomiar $2X_{\max}$ – podwójne maksymalne natężenie pola magnetycznego = $2H_{\max}$ między punktami A i D.



Ustawiamy kursor za pomocą myszki w najdalszym od środka punkcie po lewej stronie histerezy i naciskając lewy klawisz myszki rysujemy **linię pionową** przechodzącą przez dany punkt. Po zwolnieniu klawisza na ekranie pojawia się linia przerywana, której położenie możemy korygować z klawiatury przyciskami  i . Położenie linii jest wyświetlane na ekranie w miliwoltach $x = \dots\text{mV}$. Niepewność pomiarowa Δx jest równa zmianie położenia linii przerywanej po jednokrotnym

naciśnięciu klawisza kierunkowego. Następnie ustawiamy kursor w najdalszym od środka punkcie po prawej stronie i rysujemy linię pionową. Po zwolnieniu klawisza pojawia się druga linia przerywana, a na ekranie wyświetla się jej położenie $o = \dots \text{mV}$ oraz odległość między liniami $x_0 = \dots \text{mV}$. Wyznaczamy niepewność pomiarową Δo . Mierzona wartość $2X_{\max} = x_0$, zaś $\Delta 2X_{\max} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta o^2}$.

Pomiar $2X_C$ – podwójne natężenie pola koercji = $2H_C$ między punktami C i C’.


Ustawiamy kursor za pomocą myszki po lewej stronie w miejscu, gdzie os X (linia pozioma 1250 mV) przecina histerezę i naciskając lewy klawisz myszki rysujemy **linię pionową** przechodzącą przez dany punkt. Po zwolnieniu klawisza na ekranie pojawia się linia przerywana i jej położenie $x = \dots \text{mV}$. Wyznaczamy niepewność pomiarową Δx . Następnie ustawiamy kursor po prawej stronie w punkcie przecięcia osi X i histerezy i rysujemy linię pionową. Po zwolnieniu klawisza pojawia się druga linia przerywana, a na ekranie wyświetla się jej położenie $o = \dots \text{mV}$ oraz odległość między liniami $x_0 = \dots \text{mV}$. Wyznaczamy niepewność pomiarową Δo . Mierzona wartość $2X_C = x_0$, zaś $\Delta 2X_C = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta o^2}$.

Pomiar $2Y_{\max}$ – podwójna maksymalna indukcja magnetyczna = $2B_{\max}$ między punktami A i D.

Ustawiamy kursor za pomocą myszki w najniższym punkcie histerezy i naciskając lewy klawisz myszki rysujemy **linię poziomą**. Po zwolnieniu klawisza na ekranie pojawia się linia przerywana. Położenie linii jest wyświetlane na ekranie $x = \dots \text{mV}$. Korekcję położenia linii przerywanej umożliwiają klawisze  i . Wyznaczamy niepewność pomiarową Δx . Następnie ustawiamy kursor w miejscu przecięcia górnej gałęzi histerezy z osią Y i rysujemy linię poziomą. Po zwolnieniu klawisza pojawia się druga linia przerywana. Na ekranie wyświetla się jej położenie $o = \dots \text{mV}$ oraz odległość między liniami $x_0 = \dots \text{mV}$. Wyznaczamy niepewność pomiarową Δo . Mierzona wartość $2Y_{\max} = x_0$, zaś $\Delta 2Y_{\max} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta o^2}$.

Pomiar $2Y_R$ – podwójna pozostałość magnetyczna = $2B_R$ między punktami M i M’.

Ustawiamy kursor za pomocą myszki w miejscu przecięcia dolnej gałęzi histerezy z pionową linią centralną i naciskając lewy klawisz myszki rysujemy **linię poziomą**. Po zwolnieniu klawisza na ekranie pojawia się linia przerywana i jej położenie $x = \dots \text{mV}$. Wyznaczamy niepewność pomiarową Δx . Następnie ustawiamy kursor w miejscu przecięcia górnej gałęzi histerezy z osią Y i rysujemy linię poziomą. Po zwolnieniu klawisza pojawia się druga linia przerywana. Na ekranie wyświetla się jej położenie $o = \dots \text{mV}$ oraz odległość między liniami $x_0 = \dots \text{mV}$. Wyznaczamy niepewność pomiarową Δo . Mierzona wartość $2Y_R = x_0$, zaś $\Delta 2Y_R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta o^2}$.

- j) Rejestrujemy zmierzoną histerezę wybierając z menu *Edit* polecenie *Copy as graph*, następnie naciskamy przycisk  i minimalizujemy ekran PicoScopu. Otwieramy program CorelDraw i z menu Edycja wybieramy polecenie Wklej.
- k) Powracamy do programu PicoScope i naciskamy w lewym dolnym rogu ekranu przycisk **GO** wznawiając przemiatającą pętlę histerezy.
- l) Zmniejszamy natężenie prądu równymi skokami (o około 10 – 15%) tak, żeby zarejestrować od 7 do 12 pętli histerezy i mierzymy odpowiednie punkty nowych pętli histerezy, dla każdej powtarzając punkty g) i h). Uwaga: wszystkie histerezy zmierzone dla danego rdzenia wklejamy na ten sam obraz w programie CorelDraw.
- m) Uzyskany obraz drukujemy wybierając z menu programu CorelDraw polecenie wydrukuj. Na wydruku zapisujemy rodzaj rdzenia.
- n) Analogiczne pomiary wykonujemy dla pozostałych wybranych przez asystenta rdzeni.
- o) Po zakończeniu pomiarów miernik uniwersalny należy wyłączyć przestawiając gałkę na pozycję OFF.

Propozycja zapisu wyników:

Rodzaj rdzenia:.....

Dzielnik przetw.		Natężenie prądu	$2X_{\max}$ (jedn.)	$2X_C$ (jedn.)	$2Y_{\max}$ (jedn.)	$2Y_R$ (jedn.)
n_x	n_y	I_{sk} (jedn.)	$\Delta 2X_{\max}$ (jedn.)	$\Delta 2X_C$ (jedn.)	$\Delta 2Y_{\max}$ (jedn.)	$\Delta 2Y_R$ (jedn.)
		ΔI_{sk} (jedn.)				

gdzie ΔI_{sk} jest błędem systematycznym wynikającym z dokładności przyrządu. Błędy ΔX_{\max} , ΔX_C , ΔY_s , ΔY_{\max} obliczamy metodą propagacji niepewności, uwzględniając błędy Δo i Δx .

Opracowanie wyników

Dla każdego rdzenia i wszystkich natężeń prądu obliczamy wartości:

- stałych A_X i A_Y czułości kanałów „X” i „Y”;
- pola koercji H_C i amplitudy pola magnetycznego H_{\max} ;
- indukcji resztkowej B_R oraz indukcji nasycenia B_{\max} ;
- przenikalności magnetycznej μ_{\max} .
- Niepewności pomiarowe ΔH_C , ΔH_{\max} , ΔB_R , ΔB_{\max} i $\Delta \mu_{\max}$ wyznaczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.
- Na papierach milimetrycznych sporządzamy wykresy (wykresy można sporządzić wykorzystując programy komputerowe):
 - pola koercji w funkcji **natężenia prądu** I_{sk} dla wszystkich rdzeni,
 - indukcji resztkowej w funkcji **natężenia pola** H_{\max} dla wszystkich rdzeni,
 - indukcji nasycenia w funkcji **natężenia pola** H_{\max} (zależność ta nazywana jest krzywą komutacyjną i jest zbliżona do krzywej pierwotnej) dla wszystkich rdzeni,
 - przenikalności magnetycznej μ_{\max} w funkcji **natężenia pola** H_{\max} dla wszystkich rdzeni.
- Na wykresach zaznaczamy niepewności pomiarowe.

We wnioskach spróbujmy przedstawić w formie krótkiego komentarza:

- o czym świadczą otrzymane wykresy zależności $H_C(I_{sk})$, $B_R(H_{max})$, $B_{max}(H_{max})$ oraz $\mu_{max}(H_{max})$;
- ocenę, który z rdzeni jest ferromagnetykiem miękkim, a który twardym;
- ocenę, czy otrzymane wyniki są zgodne z przewidywaniami teoretycznymi.

Tabela dokładności pomiaru prądu przemiennego miernikiem SANWA typu PC510

ZAKRES	DOKŁADNOŚĆ
50Hz – 60Hz	
500,0 μ A	0,6% aktualnego wskazania + 3 cyfry
5000 μ A	
50,00mA	
500,0mA	1,0% aktualnego wskazania + 3 cyfry
5,000A	0,6% aktualnego wskazania + 3 cyfry
10,00A	

TABELA: PARAMETRY RDZENI

rdzeń	N1	L(m)	N2	S(m ²)	Dzielnik X n_x	Dzielnik Y n_y	R ₀ (k Ω)	C ₀ (μ F)	I _{MAX} (mA)
Feryt	750	0.03	2420	2.21x10 ⁻⁴	4	1	40	3	25
Spinel	5600	0.017	3920	1.77x10 ⁻⁴	1	1	40	5	4
Toroid TDK	55	0.005	220	9.75x10 ⁻⁵	8	0.1	100	0.4	50
Metglas 8	500	0.028	2000	2.2x10 ⁻⁴	8	8	10	2	60
Metglas 20	1000	0.047	4000	3.3x10 ⁻⁴	4	16	100	0.5	30
Izoperm	1400	0.021	2700	2.56x10 ⁻⁴	8	16	60	0.3	70
Blacha transformatorowa	800	0.03	4700	1.56x10 ⁻⁴	16	16	40	1	120
Armco 04J	2700	0.031	4670	2.52x10 ⁻⁴	8	32	400	0.01	50
Armco 04J W	2700	0.031	4670	2.52x10 ⁻⁴	8	32	400	0.01	50
Stal węglowa	6760	0.018	4000	2.1x10 ⁻⁴	2	32	30	0.1	17