



Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Urządzeń Elektrycznych i TWN
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
www.kueitwn.pollub.pl

LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Podstawy teoretyczne do ćwiczenia **nr 3**

Badanie podstawowych właściwości magnetycznych
materiałów ferromagnetycznych

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest pomiar podstawowych właściwości magnetycznych różnych próbek materiałów ferromagnetycznych. Należy w tym ćwiczeniu wyznaczyć:

- maksymalną indukcję magnetyczną B_m ,
- maksymalne natężenie pola magnetycznego H_m ,
- indukcję szczątkową B_k ,
- natężenie pola koercji H_k ,
- przenikalność magnetyczną względną μ .

Zaobserwowanie zachowania się pętli histerezy na ekranie oscyloskopu podczas zmian takich wartości jak amplituda napięcia i częstotliwość.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

2.1. Zjawiska magnetyczne

Przyczyną właściwości magnetycznych materii (ciał stałych) są spinowe i orbitalne momenty magnetyczne związane z elektronami oraz jądrami atomowymi należącymi do danego ciała. Wypadkowe momenty magnetyczne spinowe atomów układają się w ciele w sposób bezładny, tak że ciało nie poddane działaniu pola magnetycznego zewnętrznego nie wykazuje żadnych własności magnetycznych.

Przy pewnych wartościach stosunku odległości a między atomami do średnicy d powłoki, na której znajdują się nieskompensowane spiny elektronów, mianowicie gdy $6,4 < a/d < 12,4$, zachodzą warunki sprzyjające samorzutnemu równoległemu układaniu się wypadkowych momentów spinowych sąsiednich atomów. Powstają obszary, czyli tak zwane **domeny** o jednakowej orientacji momentów magnetycznych spinowych, zachowujące się jak odpowiednio duże dipole magnetyczne. Ciała takie nazwano **ciałami ferromagnetycznymi**, a do nich należą żelazo (Fe), kobalt (Co), nikiel (Ni).

Wspomniane obszary materiału są, przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, porozmieszczane zazwyczaj bezładnie, a ciało nie wykazuje wówczas stanu namagnesowania. Gdy ciało ferromagnetyczne znajdzie się w zewnętrznym polu magnetycznym, to w miarę zwiększania natężenia pola H poszczególne domeny zmieniają swoją orientację tak, że momenty coraz to większej liczby domen stają się zbliżone lub zgodne co do kierunku z wektorem H . To jest przyczyną łatwości magnesowania się ferromagnetyków oraz ich dużej przenikalności magnetycznej.

2.2. Wielkości charakteryzujące pole magnetyczne

Pole magnetyczne jest charakteryzowane wielkościami takimi jak: strumień magnetyczny ϕ , indukcja magnetyczna B i natężenie pola magnetycznego H . Wielkości te mierzy się, aby określić

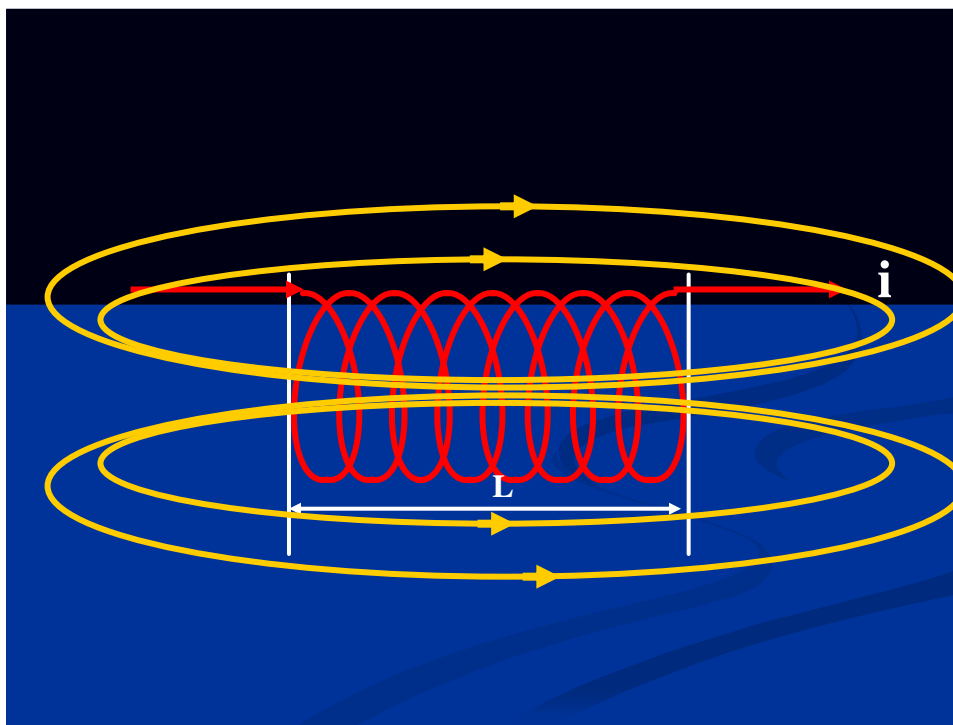
właściwości pola magnetycznego w badanej przestrzeni lub w materiałach magnetycznych, w celu wyznaczenia właściwości magnetycznych tych materiałów.

Strumień magnetyczny powstaje w wyniku działania źródła pola magnetycznego. Źródłem pola magnetycznego może być uzwojenie, przez które przepływa prąd elektryczny. W rdzeniu o przekroju poprzecznym S zamyka się strumień magnetyczny ϕ , który jest związany z indukcją magnetyczną B zależnością:

$$\phi = B \cdot S \quad (1)$$

Jednostką strumienia magnetycznego w układzie SI jest weber [1 Wb = 1 Vs].

Pole magnetyczne jest scharakteryzowane w każdym punkcie przez wektor indukcji magnetycznej B i wektor natężenia pola H .



Rys. 1. Linie sił pola magnetycznego w solenoidzie. L - długość solenoidu, N - liczba zwojów

Źródłem pola magnetycznego jest, zgodnie z prawem Ampera, przewodnik z prądem. W celu zwiększenia natężenia pola H oraz uzyskania pola jednostajnego stosuje się solenoidy, często nazywane cewkami. Są to zwinięte w spiralę przewody, tak, że w środku pozostaje swobodna przestrzeń w kształcie rury, kwadratu, prostokąta lub innych (rysunek 1).

Natężenie pola magnetycznego wewnątrz solenoidu oraz w pobliżu jego końców podawane jest wzorem:

$$H = \frac{iN}{L} \quad (2)$$

Wektor natężenia pola magnetycznego jest niezależny od ośrodka. Jednostką natężenia pola magnetycznego w układzie SI jest amper na metr [1 A/m]. Wektor indukcji magnetycznej \mathbf{B} jest charakterystyką siłową pola magnetycznego w ośrodku materialnym. Natomiast wektor natężenia pola magnetycznego charakteryzuje pole sił w danym punkcie przestrzeni. W ośrodkach jednorodnych wektory indukcji i natężenia pola magnetycznego mają ten sam kierunek i zwrot. Jednostką indukcji magnetycznej w układzie SI jest Tesla [1 T].

Iloraz modułów wektora \mathbf{B} i \mathbf{H} w ośrodkach jednorodnych nosi nazwę przenikalności magnetycznej bezwzględnej μ , której jednostką jest henr na metr [1 H/m].

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3)$$

Istnieje jeszcze pojęcie przenikalności względnej μ_r oraz przenikalności bezwzględnej próżni μ_0 (stała magnetyczna).

$$\mu_r = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \quad (4)$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (5)$$

Przenikalność magnetyczna względna wskazuje ile razy przenikalność danego środowiska jest większa od przenikalności próżni μ_0 .

Przenikalność względna μ_r jest wielkością niemianowaną dla dużej liczby ciał jest stała i niezależna od natężenia pola. Materiały, dla których $\mu_r < 1$ nazywa się diamagnetykami, ciała o $\mu_r > 1$ paramagnetykami, a ciała o $\mu_r \gg 1$ nazywa się ferromagnetykami.

Gdy umieścimy wewnątrz solenoidu rdzeń z materiału ferromagnetycznego, powstanie w nim pole magnetyczne o indukcji, zwiększonej μ_r razy w porównaniu z solenoidem bez rdzenia.

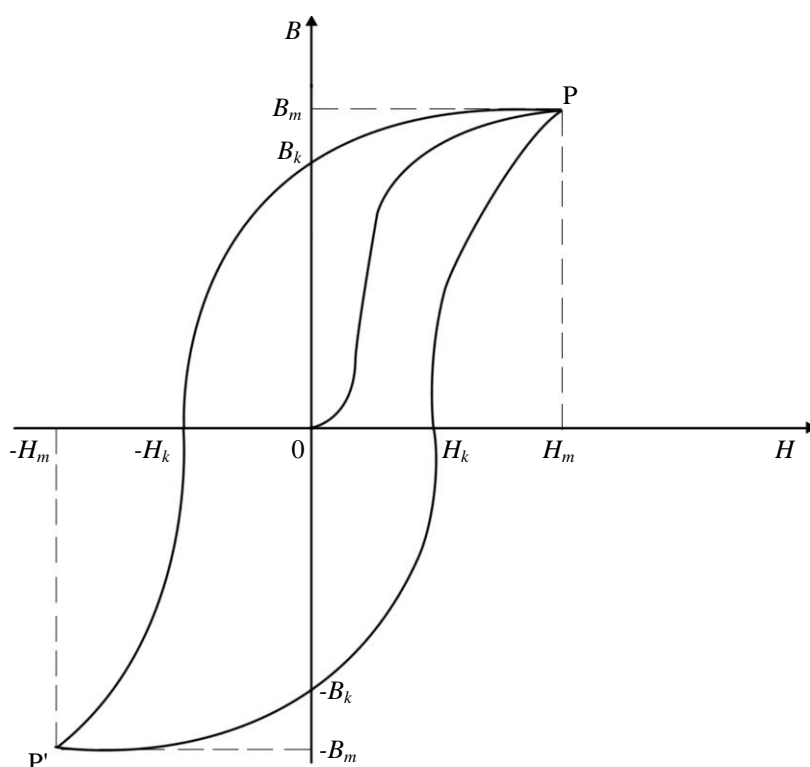
2.3. Magnesowanie materiału ferromagnetycznego

Dla próbki materiału ferromagnetycznego uprzednio nienamagnesowanego $B = 0$ i $H = 0$. Magnesowanie takiej próbki polega na zwiększaniu natężenia pola magnetycznego H , co powoduje wzrost jego indukcji B (patrz rysunek 2). Uzyskuje się to poprzez płynne zwiększanie amplitudy natężenia prądu, płynącego przez solenoid. Należy zwrócić uwagę na to, iż blisko początku układu współrzędnych natężenie pola (H) rośnie szybciej niż indukcja pola magnetycznego (B), krzywa przybiera postać paraboli. Dalej zaobserwować można jednakowy przyrost indukcji i natężenia pola, krzywa jest prostoliniowa. Dalszy wzrost B i H powoduje paraboliczne zakrzywienie krzywej magnesowania, aż do momentu, gdy dalszy wzrost indukcji jest niewielki w porównaniu do wzrostu natężenia pola. Dużemu przyrostowi natężenia pola odpowiada niewielki przyrost indukcji. Dalsze

zwiększanie amplitudy doprowadzi próbkę do nasycenia magnetycznego, wtedy to indukcja nie zmienia się, pomimo dalszego wzrostu natężenia pola. Tej sytuacji odpowiada odcinek prosty, równoległy do osi natężenia pola H . Tak otrzymana charakterystyka nosi nazwę **krzywej magnesowania pierwotnego**.

Właściwości materiałów ferromagnetycznych określa się wieloma parametrami. Najbardziej uniwersalną charakterystyką materiału ferromagnetycznego jest **pętla histerezy**.

Magnesując materiał ferromagnetyczny od punktu 0 do wartości H_m i B_m (punkt P), a następnie zmniejszając natężenie pola H , począwszy od H_m do zera, otrzymamy krzywą $H_m - B_k$. Jak widać, charakterystyka magnesowania ciała już namagnesowanego na drodze 0 - P, nie przebiega ponownie po tej samej drodze, lecz wyżej - po drodze P - B_k . Gdy zmniejszamy natężenie pola H do wartości $H = 0$, indukcja B nie spada do wartości zero, ale ma wartość $B = B_k \neq 0$. Jest to tak zwany magnetyzm szczątkowy lub pozostałość magnetyczna (remanent magnetyczny). Aby go zlikwidować należy zmienić kierunek natężenia pola H na przeciwny, doprowadzając je do takiej wielkości, aż indukcja spadnie do $B = 0$, odpowiada temu $H = -H_k$. Natężenie pola H_k potrzebne do zlikwidowania indukcji remanentu nazywa się natężeniem pola koercji bądź koercją. Magnesując próbkę dalej, zmniejszając natężenie pola aż do $-H_m$, której to wartości odpowiada $-B_m$ doprowadzimy do ponownego namagnesowania materiału (punkt P' na rysunku 2).



Rys. 2. Pętla histerezy magnetycznej ciała ferromagnetycznego

Zwiększając od punktu P' natężenie pola magnetycznego do H_m zamykamy całą krzywą, wracając do punktu P. Pętla histerezy jest krzywą symetryczną względem punktu 0.

Forma krzywej i charakterystyczne jej parametry: indukcja nasycenia B_m , indukcja szczątkowa B_k i koercja H_k zależą od rodzaju ciała ferromagnetycznego. I tak ciała które mają szeroką pętlę histerezy nazywa się ciałami magnetycznie twardymi. Nadają się one do produkcji magnesów trwałych, ponieważ odmagnesowują się bardzo trudno i są odporne na wstrząsy, zachowując swój magnetyzm szczątkowy.

Ciała magnetycznie miękkie mają wąską pętlę histerezy, zatem do zlikwidowania magnetyzmu szczątkowego B_k potrzebne jest małe natężenie koercji H_k . Materiały o wąskiej pętli histerezy odmagnesowują się bardzo łatwo, nawet przy wstrząsach.

2.4. Straty powstające podczas przemagnesowania ferromagnetyków

Podczas przemagnesowywania materiału ferromagnetycznego w granicach $+H_m$ i $+B_m$ otrzymuje się charakterystykę w postaci pętli histerezy. Jej pole jest proporcjonalne do energii straconej na jednostkę objętości podczas przemagnesowywania. Moc stracona na histerezę w jednostce objętości danego materiału przy częstotliwości f jest równa:

$$P_h = f \oint H dB \quad (6)$$

Z pewnymi uproszczeniami wzór na straty histerezowe można zapisać w postaci:

$$P_h \approx \chi f B_m^{1,6}, \quad (7)$$

gdzie: f - częstotliwość napięcia przemiennego, B_m - maksymalna wartość indukcji w cewce, χ - współczynnik liczbowy.

Oprócz strat na histerezę w materiałach magnetycznych występują straty wiropądowe. Straty na prądy wirowe na jednostkę masy wyraża się w watach na kilogram [W/kg], zgodnie ze wzorem:

$$P_w = \frac{4B_m^2 f^2 d^2 k^2}{3D\rho} \cdot 10^{-11}, \quad (8)$$

gdzie: d - grubość, D - gęstość masy, k - współczynnik zależny od krzywej magnesowania, B_m - indukcja maksymalna, f - częstotliwość, ρ - rezystywność.

Straty mocy przypadające na prądy wirowe są proporcjonalne do kwadratu częstotliwości, kwadratu indukcji magnetycznej i kwadratu grubości blach, a odwrotnie proporcjonalne do rezystywności blachy. Dodatek około 4% krzemu powoduje prawie pięciokrotny wzrost rezystywności, a tym samym zmniejszenie strat wiropądowych.

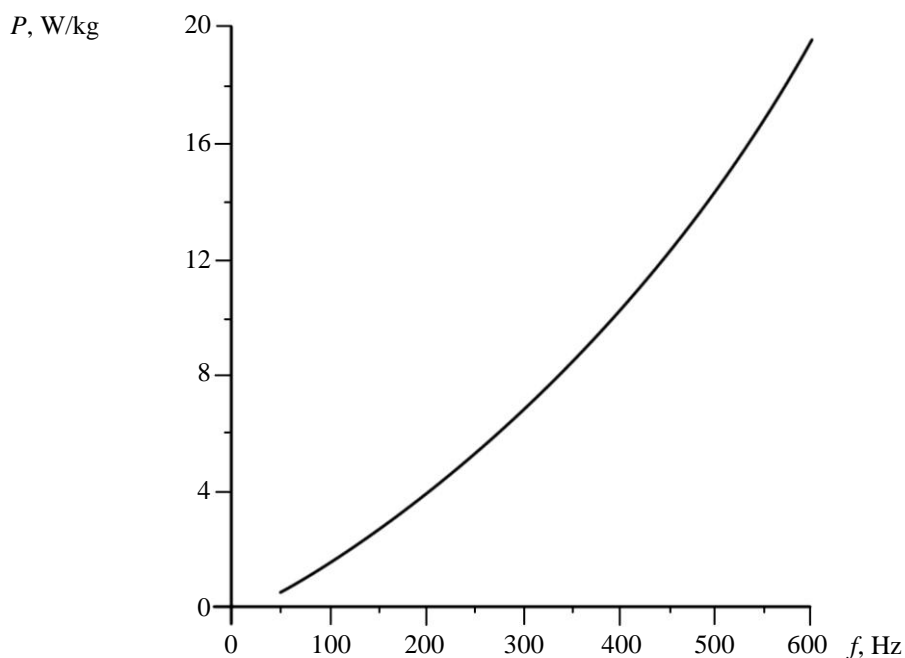
Mierząc straty całkowite w danym rdzeniu przy różnych częstotliwościach można wyznaczyć straty histerezowe i straty wiropądowe. Suma tych strat daje straty całkowite, powstałe w danym

materiale. W praktyce podaje się zwykle stratność danego materiału na 1 kg, przy danej częstotliwości (np. $f = 50$ Hz) i przy danej amplitudzie indukcji magnetycznej (np. 1 T).

2.5. Wpływ częstotliwości na straty w materiałach ferromagnetycznych

Moc maszyn elektrycznych pracujących w zmiennych polach magnetycznych jest proporcjonalna do częstotliwości zmian tych pól. Jedną z ważniejszych cech maszyn elektrycznych jest możliwość znacznego zwiększenia ich mocy kosztem zwiększenia częstotliwości pola. W przypadku odpowiedniego doboru materiałów moc takich maszyn może być podwyższona przy jednoczesnym obniżeniu wymiarów i masy. Zastosowanie materiałów magnetycznych w tych maszynach elektrycznych jest racjonalne tylko pod warunkiem obniżonych strat energii przy przemagnesowaniu pola o podwyższonej częstotliwości.

Rysunek 3 przedstawia zależność od częstotliwości całkowitych strat w blasze elektrotechnicznej grubości 0,35 mm dla $B = 0,75$ T. Z rysunku 3 widać, że straty te zależą od częstotliwości pola magnesującego. Zależność ta określana jest przeważnie przez mikro lub makro prądy, które powstają podczas przemagnesowywania materiałów. Straty całkowite zależą od indukcji i okazuje się, że im większa grubość tej blachy, tym nieliniowość strat zwiększa się. Natomiast dla małych grubości nieliniowość jest mniejsza. Nieliniowość zależności strat od amplitudy maksymalnej indukcji pola magnetycznego określa się tym, że straty przeważnie idą na prądy wirowe, a prądy te rosną wraz ze wzrostem amplitudy indukcji. Największy wkład w straty mają prądy wirowe (około 30%) i dlatego konieczne jest zwiększenie oporu magnetycznego blachy.



Rys. 3. Wykres zależności strat całkowitych od częstotliwości w blasze elektrotechnicznej o grubości 0,35 mm przy indukcji $B = 0,75$ T

2.6. Zastosowanie materiałów ferromagnetycznych

Materiały ferromagnetyczne odgrywają bardzo istotną rolę w przetwornikach energii elektrycznej w energię magnetyczną, która jest następnie przekształcona w energię elektryczną o innym napięciu i prądzie lub w energię mechaniczną, na przykład w transformatorach, maszynach elektrycznych, przekładnikach, głośnikach, przetwornikach magnetostrykcyjnych oraz w energię chemiczną przez wykorzystanie sproszkowanych materiałów magnetycznych jako katalizatorów. Jednak podstawowym celem wykorzystania materiałów magnetycznych jest zapewnienie możliwie największej sprawności energetycznej.

Blachy elektrotechniczne muszą mieć dużą przenikalność magnetyczną i małą stratność na jednostkę masy. Blachy elektrotechniczne stosowane do budowy rdzeni transformatorowych zawierają około 4 % krzemu. Obróbka mechaniczna tych blach jest prostsza niż blach do maszyn wirujących. W blachach do maszyn wirujących zawartość krzemu wynosi około 2,5 %. Blachy do większości maszyn wirujących mają grubość 0,5 mm, a do budowy transformatorów i dużych turbogeneratorów mają grubość 0,35 mm.

Ferryty mają o kilka rzędów wielkości większą rezystywność, co czyni je bardzo użytecznymi w zastosowaniach. Ferryty $MgAl_2O_4$ stanowią materiały magnetycznie miękkie i są stosowane na rdzenie podzespołów indukcyjnych. Z uwagi na jednorodność wymagań w wielu zastosowaniach, materiały te można następująco podzielić:

- materiały na rdzenie do wysokostabilnych cewek i filtrów teletransmisyjnych na zakres częstotliwości do 2 MHz,
- materiały na rdzenie do transformatorów, w tym pracujących przy dużych indukcjach ($B > 10$ mT), na zakres częstotliwości $0,3 \div 10$ MHz,
- materiały na rdzenie do obwodów rezonansowych cewek i filtrów na zakres częstotliwości do 200 MHz.

Poza wyżej wymienionymi grupami materiałów istnieją inne, które można zaliczyć do materiałów magnetycznie miękkich, lecz z uwagi na odrębność ich własności i spełnianych funkcji stanowią oddzielne grupy. Są to mianowicie ferryty o prostokątnej pętli histerezy na rdzenie pamięciowe do elektronicznych maszyn cyfrowych i na rdzenie do elementów logicznych w układach automatyki oraz części materiałów mikrofalowych.

3. PROGRAM ĆWICZENIA

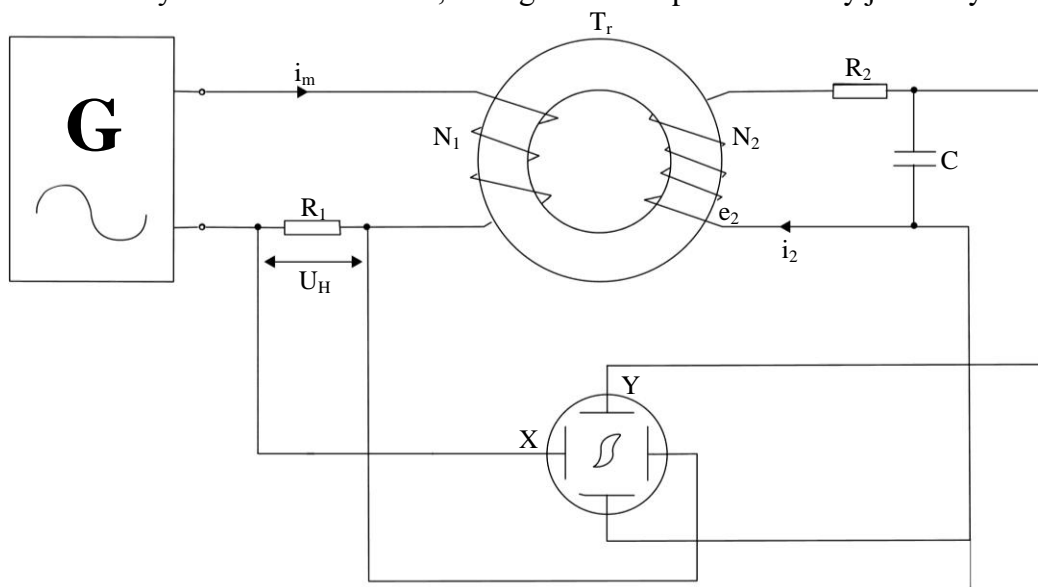
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych należy wyznaczyć następujące wielkości magnetyczne:

- maksymalną indukcję magnetyczną B_m ,
- maksymalne natężenie pola magnetycznego H_m ,
- indukcję szczątkową B_k ,
- natężenie pola koercji H_k .

Ponadto, należy wykreślić pętlę histerezy zaobserwowaną na ekranie lampy oscyloskopowej. Jednocześnie niezbędne jest obserwowanie zmiany kształtu krzywej przy zmianach częstotliwości, a szczególnie pola koercji.

3.1. Układ pomiarowy

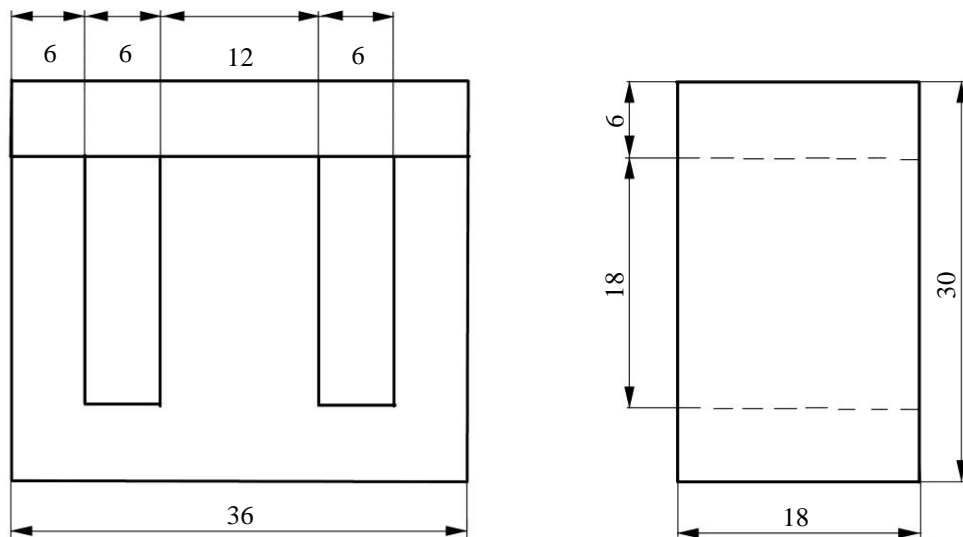
Pomiarów należy dokonać w układzie, którego schemat przedstawiony jest na rysunku 4.



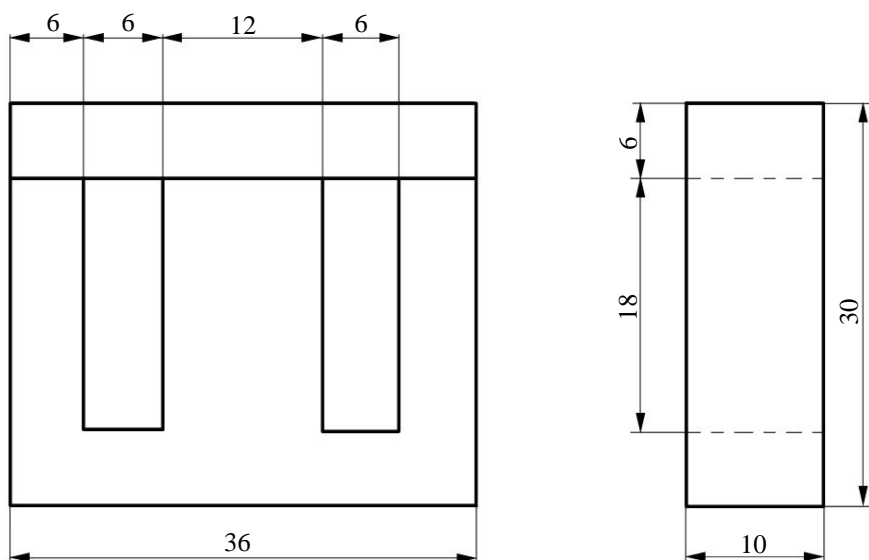
Rys. 4. Układ do pomiaru podstawowych właściwości magnetycznych

W układzie tym zastosować należy:

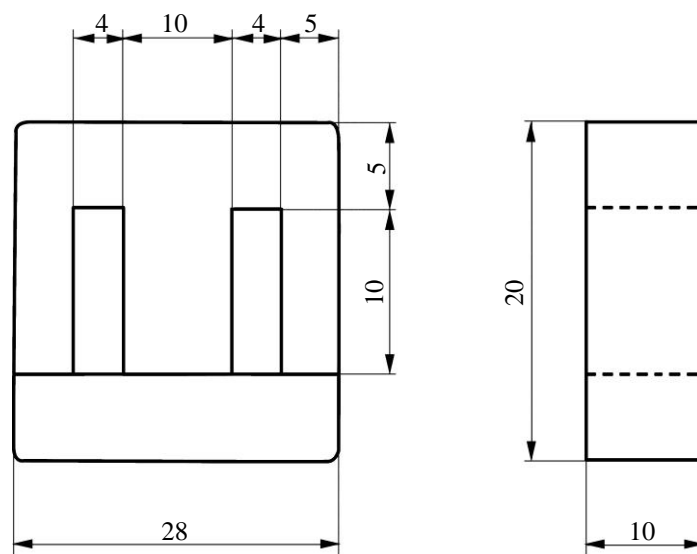
- generator przebiegów sinusoidalnych,
- układ materiałów ferromagnetycznych składających się z:
 - a) próbki z blachy transformatorowej,
 - b) próbki z blachy na podwyższone częstotliwości,
 - c) próbki z ferrytu,
- oscyloskop dwukanałowy.



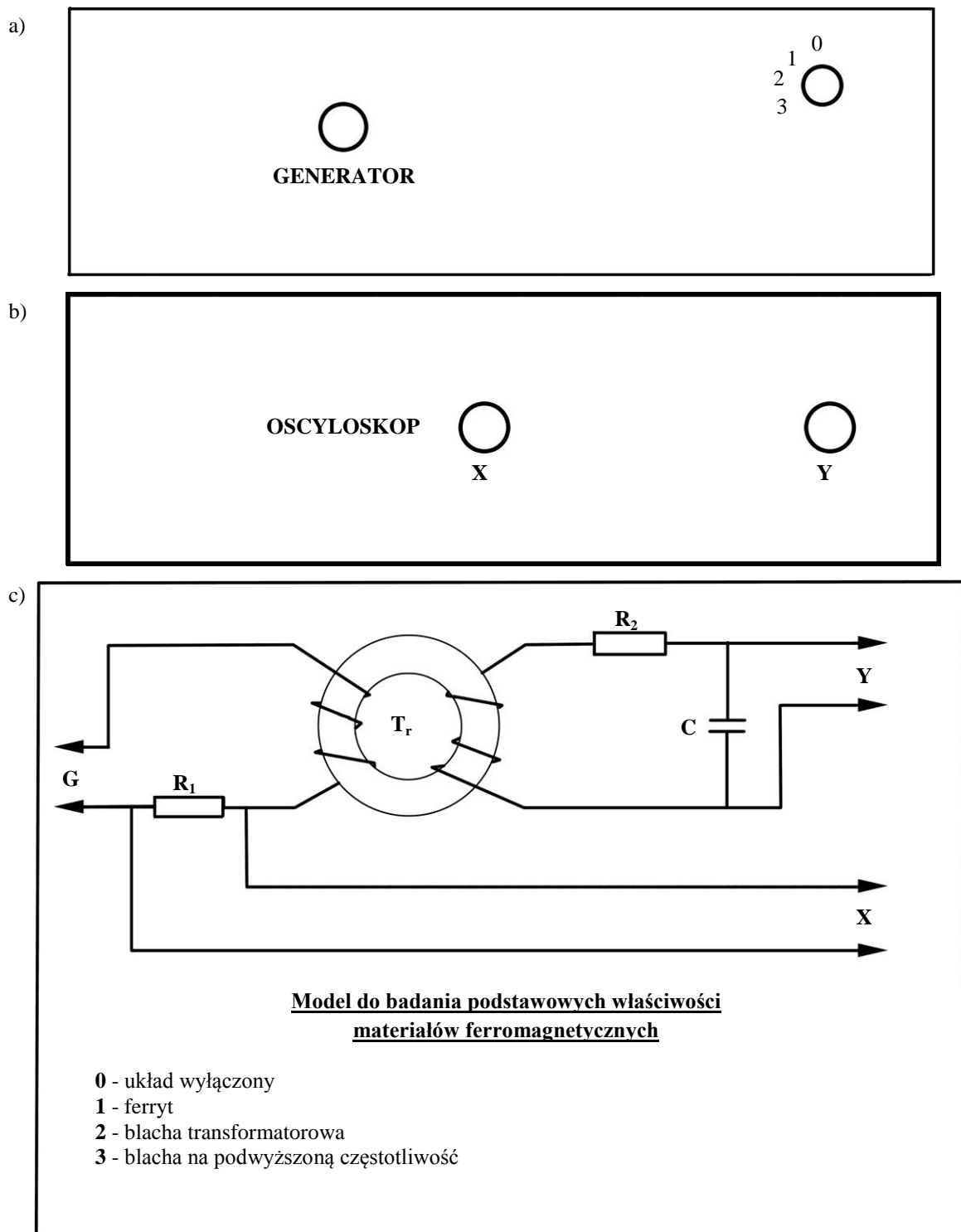
Rys. 5. Rdzeń z blachy transformatorowej



Rys. 6. Rdzeń z blachą na podwyższoną częstotliwość



Rys. 7. Rdzeń ferrytowy



Rys. 8. Widok obudowy: a) płyta czołowa, b) płyta tylna, c) płyta górna

4. PRZEPROWADZENIE POMIARÓW

Badania należy rozpocząć od połączenia układu pomiarowego zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 4 (umieszczony na obudowie układu próbek). W tym celu do wybranej próbki materiału ferromagnetycznego należy dołączyć na wejście sygnał z generatora, a następnie do tej samej próbki należy dołączyć oscyloskop. Szczególną uwagę trzeba zwrócić na odpowiednie

połączenie kanałów odchylenia pionowego i poziomego. Następnym krokiem jest włączenie do sieci generatora i oscyloskopu oraz ich włączenie. Po tych czynnościach należy ustawić plamkę świetlną tak, aby znajdowała się w części centralnej ekranu oscyloskopu. Dalej na generatorze ustawia się żądaną częstotliwość i amplitudę sygnału sinusoidalnego.

W ten sposób zaobserwuje się na ekranie oscyloskopu zależność $B = f(H)$, tzw. pętlę histerezy. Z tej krzywej należy odczytać następujące wartości:

- maksymalną indukcję magnetyczną B_m ,
- maksymalne natężenie pola magnetycznego H_m ,
- indukcję szczątkową B_k ,
- natężenie pola koercji H_k .

Następnie należy obliczyć wartości przenikalności magnetycznej i zanotować w tabeli 1.

Wartości te mogą być odczytywane z jednej połówki, gdyż pętla histerezy jest krzywą symetryczną. Odczytane wartości powinny być umieszczone w tabeli pomiarowej. Wykorzystując wyniki pomiarów należy oszacować straty powstałe w badanej próbce.

Następnie, zachowując na stałym poziomie wartość amplitudy sygnału z generatora należy zmieniać częstotliwość. Po każdej zmianie częstotliwości odczytuje się charakterystyczne punkty pętli histerezy. W tym czasie należy zwrócić szczególną uwagę na pole koercji oraz kształt pętli histerezy. W ten sposób należy porównać ze sobą dwie dowolne próbki ferromagnetyków.

Układ pomiarowy umożliwi także wyznaczenie krzywej pierwotnego magnesowania. W tym celu należy dla danej częstotliwości ustawić amplitudę sygnału sinusoidalnego równą 0, a następnie zwiększając wartość amplitudy odczytać tylko wartości maksymalne (B_m, H_m) z ekranu oscyloskopu.

4.1. Tablice pomiarowe

Wyniki pomiarów należy umieścić w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów pętli histerezy

L.p.	B_m	H_m	B_k	H_k	B_m	H_m	B_k	H_k	μ
	dz	dz	dz	dz	T	A/m	T	A/m	-
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									

Ćw. 3. Badanie podstawowych właściwości magnetycznych materiałów ferromagnetycznych

$$H = \frac{N_1(V_x U_x)}{R_1 l_{sr}}, \quad (9)$$

$$B = \frac{R_2 C(V_y U_y)}{N_2 S}, \quad (10)$$

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (11)$$

gdzie: U_x, U_y - działki odczytane z oscyloskopu.

Tabela 2. Charakterystyczne parametry badanych ferromagnetyków

V_x	V_y	R_1	R_2	N_1	N_2	C	S	l_{sr}
V/cm	V/cm	Ω	Ω	-	-	μF	m^2	m
Blacha transformatorowa								
0,1	0,1	4,7	910	300	60	20	0,00054	0,102
Ferryt								
0,05	0,05	4,7	90	360	48	20	0,0002	0,091
Blacha na podwyższone częstotliwości								
0,1	0,1	4,7	910	480	32	20	0,0003	0,102

Oznaczenia w tabelach:

- V_x - stała oscyloskopu odchylenia poziomego,
- V_y - stała oscyloskopu odchylenia pionowego,
- $U_{x \max}$ - napięcie (działki odczytane z oscyloskopu),
- $U_{y \max}$ - napięcie (działki odczytane z oscyloskopu),
- $U_{x k}$ - napięcie,
- $U_{y k}$ - napięcie,
- R_1 - rezystancja rezystora wejściowego,
- R_2 - rezystancja rezystora po stronie wtórnej,
- l_{sr} - średnia droga strumienia magnetycznego,
- S - pole przekroju poprzecznego próbki,
- H_m - maksymalne natężenie pola magnetycznego,
- B_m - indukcja maksymalna,
- B_k - indukcja koercji,
- H_k - natężenie pola koercji,
- N_1 - uzwojenie pierwotne próbki,
- N_2 - uzwojenie wtórne próbki,
- C - pojemność kondensatora.

5. SPORZĄDZENIE WYKRESÓW

Należy wykonać osobne wykresy zależności indukcji magnetycznej B oraz przenikalności magnetycznej μ od natężenia pola magnetycznego H , dla dwóch próbek materiałów magnetycznych przy częstotliwościach: 50 Hz, 60, Hz, 80 Hz, 100 Hz, 150 Hz, a dla ferrytu w zakresie od 1,2 kHz do 2 kHz.

6. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy umieścić:

- schemat układu pomiarowego,
- tabele wyników i pomiarów według punktu 4.1,
- wykres zależności $B = f(H)$,
- wykres zależności $\mu = f(H)$,
- uwagi i wnioski dotyczące warunków i sposobu przeprowadzenia pomiarów oraz ocenę otrzymanych wyników.

7. PYTANIA KONTROLNE

- Podział materiałów magnetycznych.
- Wymienić rodzaje materiałów ferromagnetycznych.
- Wyjaśnić zjawisko magnetyzmu.
- Omówić charakterystykę magnesowania pierwotnego.
- Charakterystyczne parametry pętli histerezy.
- Omówić powstawanie i wpływ prądów wirowych.
- Wyjaśnić powstawanie strat w materiale ferromagnetycznym.
- Sposoby obniżenia strat w materiałach ferromagnetycznych.
- Wpływ częstotliwości na straty.
- Metody badań właściwości materiałów magnetycznych.

8. LITERATURA

- Chwaleba A.: *Metrologia elektryczna*. Warszawa, WNT 1994.
- Kurdziel R.: *Podstawy elektrotechniki*. Warszawa, WNT 1973.
- Sukiennicki A., Zagórski A.: *Fizyka ciała stałego*. Warszawa, WNT 1984.
- Szydłowski H.: *Pracownia fizyczna*. Warszawa, PWN 1989.
- Wąsowski J.: *Podstawy elektrotechniki*. Katowice, Uniwersytet Śląski 1976.