

ĆWICZENIE NR 17

WYZNACZANIE STRATNOŚCI MAGNETYCZNEJ ORAZ KRZYWYCH
MAGNESOWANIA APARATEM EPSTEINA 25 cm*(opracował Eligiusz Pawłowski)***1. Cel i zakres ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy i zastosowania aparatu Epsteina 25cm do pomiaru własności magnetycznych stalowych blach i taśm elektrotechnicznych według normy PN-EN 60402-2 [1]. Zakres ćwiczenia obejmuje: wyznaczenie dynamicznej krzywej magnesowania, wykonanie pomiarów stratności magnetycznej oraz przeprowadzenie rozdziału strat magnetycznych. Dodatkowym wstępnym zadaniem jest skalowanie transformatora powietrznego i wyznaczenie jego indukcyjności wzajemnej.

2. Wprowadzenie teoretyczne**2.1. Straty magnetyczne**

Przebiegiem strumień magnetyczny przenikający rdzenie magnetyczne maszyn elektrycznych i transformatorów przenosi energię, której część jest zamieniana w tych rdzeniach na ciepło i oddawana do otoczenia, a tym samym bezpowrotnie tracona. Powstające w ten sposób straty energetyczne na magnesowanie rdzenia są bardzo ważnym parametrem właściwości magnetycznych stalowych blach i taśm elektrotechnicznych [2], [3], którego znajomość jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania każdej maszyny elektrycznej i transformatora. Moc odpowiadająca traconej w ten sposób energii jest nazywana stratami magnetycznymi lub stratami w żelazie P_{Fe} . Straty magnetyczne powstają wskutek zjawiska histerezy magnetycznej i prądów wirowych [4]. Część strat magnetycznych będących wynikiem zjawiska histerezy nazywamy stratami histerezowymi P_h , a pozostałe straty magnetyczne związane z występowaniem prądów wirowych nazywamy stratami wiroprądowymi P_w .

Wartość strat magnetycznych P_{Fe} podczas przemagnesowywania ferromagnetycznego rdzenia przebiegiem strumieniem magnetycznym zależy od następujących parametrów:

- maksymalnej (szczytowej) wartości indukcji magnetycznej B_{max} ,
- częstotliwości f strumienia magnetycznego,
- współczynnika kształtu k krzywej napięcia indukowanego w uzwojeniu,
- masy m żelaza użytego do budowy rdzenia,
- temperatury rdzenia i jego składu chemicznego.

Ogólna zależność opisująca straty magnetyczne w żelazie P_{Fe} jest następująca:

$$P_{Fe} = P_h + P_w = c_h B_{max}^\alpha f + c_w B_{max}^2 k^2 f^2, \quad (1)$$

przy czym: α , c_h , c_w są współczynnikami stałymi, zależnymi od rodzaju materiału [4]. Straty histerezowe P_h są proporcjonalne do częstotliwości f i indukcji maksymalnej B_{max} podniesionej do potęgi α (przy czym $\alpha = 1,6 \div 3,2$). Straty wiroprądowe P_w są proporcjonalne do kwadratów: indukcji maksymalnej B_{max} , współczynnika kształtu k i częstotliwości f .

Stratnością magnetyczną p_{Fe} nazywamy straty magnetyczne P_{Fe} przypadające na 1 kg masy żelaza w rdzeniu m_{Fe} , przy określonej indukcji maksymalnej B_{max} , częstotliwości f i sinusoidalnym kształcie krzywej napięcia ($k=1,111$):

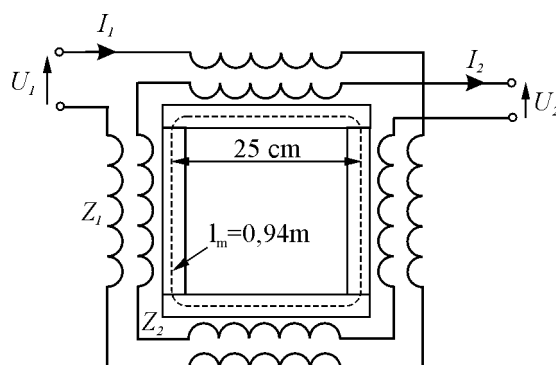
$$p_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{m_{Fe}} \quad (2)$$

Blachy elektrotechniczne to specjalny rodzaj blach stalowych przeznaczonych do budowy rdzeni obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych i transformatorów. Ich głównym składnikiem jest żelazo, jednak różnią się one zasadniczo składem chemicznym od stalowych blach konstrukcyjnych. Przede wszystkim pozbawione są one dodatku węgla, zawierają natomiast kilkuprocentowy dodatek krzemu oraz innych metali (niklu, chromu, kobaltu, miedzi, aluminium itp.). Zapewnia to blachom elektrotechnicznym właściwości materiału magnetycznie miękkiego oraz niską stratność magnetyczną. Współczesne blachy elektrotechniczne mogą pracować przy indukcji maksymalnej nie przekraczającej 2 T, zazwyczaj jednak są stosowane przy indukcjach około 1 ÷ 1,5 T, wykazują przy tym przy częstotliwości 50 Hz stratność rzędu pojedynczych W/kg. Dodatkowo, zależnie od przeznaczenia, rozróżnia się blachy prądnicowe i transformatorowe. Blachy prądnicowe mają właściwości izotropowe [2] i przeznaczone są do pracy w wirującym polu magnetycznym, natomiast blachy transformatorowe mają właściwości anizotropowe [3] i przeznaczone są do pracy w polu o ustalonym kierunku, przy zmieniającym się tylko jego zwrocie.

Znajomość stratności magnetycznej p_{Fe} jest niezbędna do oceny jakości blach elektrotechnicznych wyprodukowanych w hucie [2], [3]. Z tego względu sposób pomiaru stratności został szczegółowo znormalizowany [1]. Powszechnie stosowanym urządzeniem do pomiaru strat magnetycznych jest aparat Epsteina 25 cm, współpracujący z watomierzem i innymi miernikami kontrolnymi.

2.2. Budowa aparatu Epsteina 25 cm

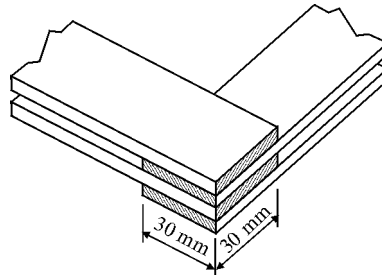
Aparat Epsteina jest transformatorem probierczym skonstruowanym na potrzeby badania właściwości magnetycznych blach elektrotechnicznych. Stałe uzwojenia pierwotne i wtórne aparatu nawinięte są na czterech otwartych korpusach, ustawionych w kwadrat. Do wnętrza cewek wsuwa się próbkę, którą stanowią cztery pakiety utworzone z prostokątnych pasków wyciętych z arkusza badanej blachy elektrotechnicznej i tworzące zamknięty obwód magnetyczny (rys.1).



Rys.1. Budowa aparatu Epsteina 25 cm

Wcześniejszym typem był aparat 50 cm, zaproponowany przez Epsteina w 1900 r. Próbką w tym aparacie składała się z czterech pakietów pasków blach o wymiarach 3 cm x 50 cm, o łącznej masie 10 kg. Pakiety były składowane, taśmowane i po zważeniu wkładane na styk do korpusów uzwojeń. Mimo docisku pakietów do siebie, w miejscach ich styku występowały szczeliny w obwodzie magnetycznym, znacznie obniżające w narożach wartość indukcji magnetycznej B . Ze względu na znaczną masę próbki, były one bardzo nieporęczne w użyciu i wymagały dość dużej ilości zużywanych do badań blach, nawet do 0,4% produkcji.

Obecnie znormalizowanym jest aparat Epsteina 25 cm [1]. Uzwojenie pierwotne i wtórne składają się z czterech cewek po 175 zwojów łączonych szeregowo (rys.1), a więc przekładnia zwojowa $z_1/z_2 = 700/700$. Każda z czterech cewek uzwojenia pierwotnego (zewnętrznego) zawiera 175 zwojów z dwóch miedzianych drutów połączonych równolegle, każdy o przekroju $1,8 \text{ mm}^2$, nawiniętych jedna na drugą w trzech warstwach, na uzwojeniu wtórnym. Każda z czterech cewek uzwojenia wtórnego (wewnętrznego) zawiera 175 zwojów pojedynczego drutu miedzianego o przekroju $0,8 \text{ mm}^2$ nawiniętego w jednej warstwie. Próbka jest tworzona z pasków $3 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$, które układa się kolejno w korpusach cewek na podwójną zakładkę tak, aby końce sąsiednich pasków zachodziły na siebie (rys.2). Średnia długość obwodu magnetycznego w tak utworzonym czworoboku wynosi $4 \times 25 \text{ cm}$, stąd nazwa aparatu Epsteina 25 cm.

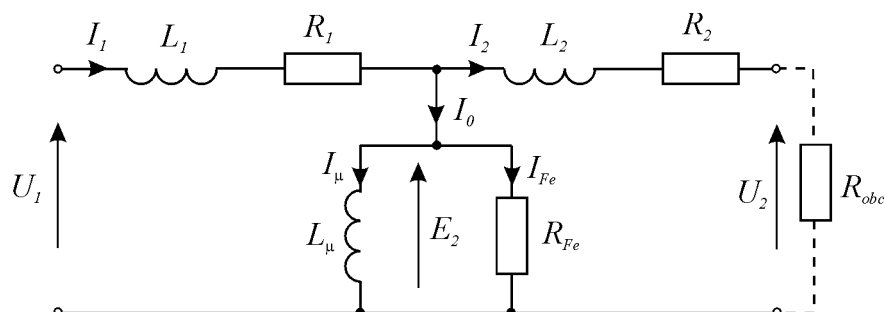


Rys.2. Łączenie blach na podwójną zakładkę w narożach aparatu Epsteina 25 cm

Masa całkowita próbki wynosi ok. 2 kg, przy czym liczba pasków w każdej cewce powinna być jednakowa, aby przekrój próbki i indukcja magnetyczna były stałe w całym obwodzie magnetycznym. Paski mogą być dłuższe (do 32 cm), ale każdy bok wewnętrznego kwadratu otworzonego przez paski próbki powinien mieć długość 220 mm. Paski powinny być cięte w połowie równolegle i w połowie prostopadłe do kierunku walcowania arkusza blachy, paski wycięte w tym samym kierunku należy umieścić w przeciwległych ramionach aparatu. Wszystkie paski powinny mieć jednakowe wymiary (szerokość $30 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ i długość $280 \text{ mm} \div 320 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$). Po wycięciu paski nie mogą być poddawane żadnej dodatkowej obróbce mechanicznej.

2.3. Pomiar strat magnetycznych aparatem Epsteina

Pracę aparatu Epsteina można analizować za pomocą schematu zastępczego transformatora (rys.3). Jest to schemat czwórnika typu T, w którym L_1 i R_1 reprezentują indukcyjność rozproszenia i rezystancję uzwojenia pierwotnego, a L_2 i R_2 odpowiednio indukcyjność rozproszenia i rezystancję uzwojenia wtórnego.



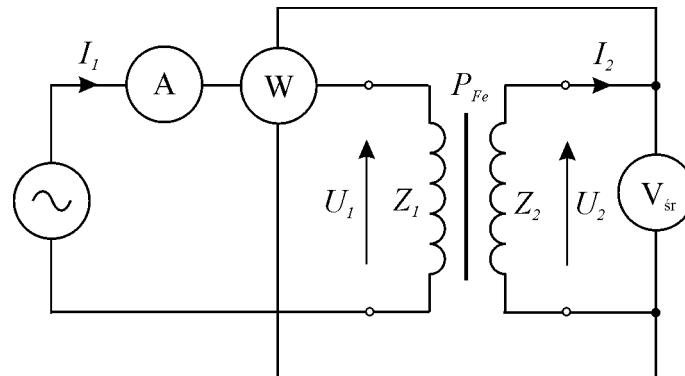
Rys.3. Schemat zastępczy aparatu Epsteina

Gałąź magnesowania posiada indukcyjność L_μ . Poszukiwane straty magnetyczne w żelazie P_{Fe} reprezentowane są przez rezystancję R_{Fe} . Zatem aby je zmierzyć, należy doprowadzić do watomierza prąd jałowy I_0 oraz napięcie indukowane E_2 . Obie te wielkości są dostępne bezpośrednio wtedy, gdy zaciski wtórne są rozwarne, t.j. $R_{abc} = \infty$ oraz $I_2 = 0$. Wtedy:

$$I_1 = I_0 , \quad (3a)$$

$$E_2 = U_2 . \quad (3b)$$

Należy więc włączyć cewkę prądową watomierza w obwód pierwotny, a tor napięciowy – do zacisków wtórnych aparatu Epsteina (rys.4). Dodatkowy woltomierz wartości średniej jest niezbędny do wyznaczenia indukcji magnetycznej B_{max} w rdzeniu. Takie połączenie watomierza zapewnia pomiar mocy w rezystancji R_{Fe} , a jednocześnie watomierz ten nie mierzy mocy w rezystancji R_1 (czyli mocy strat na rezystancji uzwojenia pierwotnego, tzw. strat w miedzi P_{Cu}).



Rys.4. Uproszczony schemat układu pomiarowego aparatu Epsteina

Należy jednak zauważyć, że po włączeniu po stronie wtórnej aparatu Epsteina torów napięciowych mierników (R_{obc} na rys.3) warunki (3a) i (3b) nie są spełnione, zachodzi więc potrzeba uwzględnienia odpowiednich poprawek do wskazania watomierza.

Warunek (3a) nie jest spełniony, gdyż $I_1 = I_0 + I_2$. Oznacza to, że moc P_m zmierzona przez watomierz jest sumą mocy strat magnetycznych P_{Fe} i poboru mocy P_2 przez obwody napięciowe mierników dołączonych do obwodu wtórnego. Zatem:

$$P_{Fe} = P_m - P_2 . \quad (4)$$

Moc P_2 można obliczyć znając napięcie wtórne U_{2sk} oraz rezystancję R_{obc} . Moc pobierana przez równolegle połączone: tor napięciowy watomierza o rezystancji R_{wn} oraz woltomierz o rezystancji R_V , jest równa:

$$P_{obc} = \frac{U_{2sk}^2}{R_{obc}} = U_{2sk}^2 \left(\frac{1}{R_{wn}} + \frac{1}{R_V} \right) . \quad (5)$$

Całkowita moc P_2 obwodu wtórnego jest nieco większa, ze względu na pobór mocy przez rezystancję R_2 uzwojenia wtórnego (rys.3). Należy więc moc pobieraną przez przyrządy zwiększyć proporcjonalnie do stosunku rezystancji:

$$P_2 = P_{obc} \frac{R_2 + R_{obc}}{R_{obc}} = P_{obc} \left(1 + \frac{R_2}{R_{obc}} \right) . \quad (6)$$

Korekta według wzoru (6) jest w praktyce bardzo mała, gdyż rezystancja R_2 aparatu Epsteina jest rzędu 2Ω [1], natomiast rezystancja przyrządów sięga wielu dziesiątek $k\Omega$. W praktyce, jeżeli $R_2/R_{obc} < 0,05\%$ to można przyjmować, że $P_2 = P_{obc}$.

Warunek (3b) nie jest ściśle spełniony ze względu na spadek napięcia na uzwojeniu wtórnym (R_2 i L_2). Stąd napięcie U_2 przyłożone do watomierza jest mniejsze od napięcia indukowanego E_2 w stosunku rezystancji:

$$U_2 = E_2 \frac{R_{obc}}{R_2 + R_{obc}} . \quad (7)$$

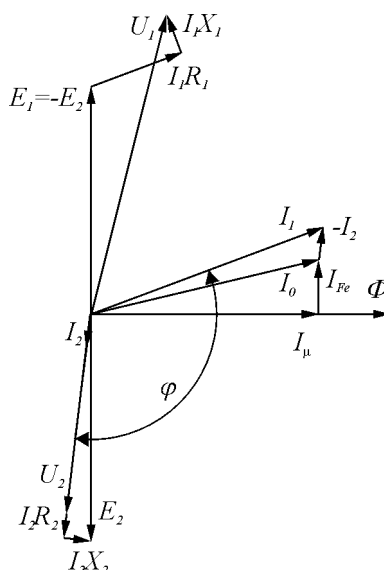
Dlatego do wskazania watomierza należy wprowadzić poprawkę, taką jak we wzorze (6). Dodatkowo należy napięcie skuteczne U_{2sk} obliczyć na podstawie napięcia średniego U_{2sr} , gdyż takie jest mierzone po stronie wtórnej woltomierzem prostownikowym. Ostatecznie ze wzorów 4, 6, 7, otrzymujemy wzór na szukane straty magnetyczne:

$$P_{Fe} = \left(P_m - \frac{(1,111 \cdot U_{2sr})^2}{R_{obc}} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_{obc}} \right) , \quad (8)$$

gdzie R_{obc} jest rezystancją zastępczą połączonych równolegle: toru napięciowego watomierza o rezystancji R_{wn} oraz woltomierza o rezystancji R_V :

$$R_{obc} = \frac{R_{wn} R_V}{R_{wn} + R_V} . \quad (9)$$

Na rys.5 przedstawiono uproszczony wykres wskazowy aparatu Epsteina [6]. Należy zwrócić uwagę, że kąt fazowy φ pomiędzy prądem I_1 obwodu prądowego watomierza i napięciem U_2 obwodu napięciowego watomierza jest stosunkowo duży (ponad 90°), a więc współczynnik mocy $\cos\varphi$ układu pomiarowego aparatu Epsteina jest bardzo mały. Wymaga to zastosowania specjalnego watomierza o małej wartości znamionowego współczynnika mocy, np.: w ćwiczeniu stosuje się watomierz posiadający $\cos\varphi_{zn} = 0,1$, którego wartość należy uwzględnić przy obliczaniu stałej watomierza k_w . Dodatkowo należy odwrócić kierunek włączenia toru napięciowego watomierza ($\cos\varphi$ jest ujemny).



Rys.5. Wykres wskazowy aparatu Epsteina

Ponieważ straty magnetyczne zależą od temperatury, pomiary należy wykonywać w znanej temperaturze otoczenia. Zalecana jest temperatura $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ [1].

2.4. Wyznaczanie stratności magnetycznej aparatem Epsteina

W praktyce dla wyznaczenia stratności magnetycznej p_{Fe} nie można zastosować bezpośrednio wzoru (2), gdyż masa próbki uzyskana po jej zważeniu nie może być w całości uwzględniona jako masa żelaza m_{Fe} , w którym wydzielają się straty magnetyczne P_{Fe} . Należy uwzględnić fakt, że blachy elektrotechniczne są izolowane na powierzchni dla ograniczenia prądów wirowych płynących w pakiecie pomiędzy sąsiednimi paskami. Stosowana jest izolacja w postaci warstwy tlenków, lakieru lub papieru. Wążąc więc próbkę wyznaczamy jej masę całkowitą m_c , od której należy odjąć udział izolacji blach (10). Udział ten jest podawany przez wytwórcę blach w procentach i masy całkowitej lub wyznacza się go doświadczalnie, wążąc kawałek blachy z izolacją i po jej usunięciu. Przeciętnie udział i izolacji tlenkowej wynosi ok. 0,5 %, natomiast papierowej i lakierowanej ok. 1 %.

$$m = m_c \cdot (100 - i) \% . \quad (10)$$

Tak uzyskana masa netto próbki m jest co prawda masą żelaza, nie może jednak być uwzględniona w całości jako m_{Fe} we wzorze (2), ze względu na specyficzny rozkład pola magnetycznego w narożach aparatu Epsteina. Powoduje to, że nie cała masa żelaza w jednakowym stopniu bierze udział w powstawaniu strat magnetycznych. Dlatego dla uzyskania stratności magnetycznej p_{Fe} wyznaczanej w aparacie Epsteina należy uwzględnić tzw. masę efektywną próbki m_a :

$$p_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{m_a} . \quad (11)$$

Aby wyznaczyć masę efektywną próbki m_a należy zauważyć, że stratność wyznaczamy dla indukcji B występującej w ramionach czworoboku próbki, natomiast w narożach indukcja jest mniejsza ze względu na zaplatanie pasków blach (rys.2). Można przyjąć, że w narożach przekrój próbki jest więc dwukrotnie większy, stąd indukcja jest tam dwa razy mniejsza, niż w ramionach (pamiętając, że strumień magnetyczny Φ w każdym miejscu obwodu magnetycznego jest taki sam). Zakładając, że straty magnetyczne P_{Fe} są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu indukcji B^2 (1), można przyjąć, że w narożach są one czterokrotnie mniejsze niż w pozostałej części próbki. Uwzględnia się to, przyjmując w obliczeniach zastępczą masę naroży czterokrotnie mniejszą od rzeczywistej. W rezultacie dla stosowanych wymiarów pasków badanej blachy (3 cm x 28 cm) otrzymuje się masę efektywną próbki m_a :

$$m_a = m \frac{l_m}{4 \cdot l} = m \frac{4 \cdot (22 + \frac{1}{4} \cdot 6) \text{ cm}}{4 \cdot 28 \text{ cm}} = \frac{94}{112} m , \quad (12)$$

gdzie l jest długością paska blachy, a l_m jest umowną efektywną długością drogi strumienia magnetycznego [1]. Jak wynika z przeprowadzonej powyżej analizy, dla aparatu Epsteina 25 cm umowna efektywna długość drogi strumienia magnetycznego $l_m = 0,94$ m.

2.5. Wyznaczanie indukcji magnetycznej w próbce

Dla charakteryzowania właściwości blach elektrotechnicznych przyjęto podawać stratność dla indukcji B_{max} równej 1,0 T i 1,5 T, a dla blach anizotropowych dodatkowo dla 1,7 T.

Uwaga: w normie [1] w miejsce nazwy „indukcja magnetyczna” i oznaczenia B stosowane jest określenie „polaryzacja magnetyczna” i oznaczenie J . Oznaczenia stosowane w niniejszej instrukcji są zgodne z Międzynarodowym Układem Jednostek Miar SI.

Wartość maksymalną indukcji magnetycznej B_{max} wyznacza się pośrednio na podstawie związku pomiędzy indukcją a napięciem indukowanym w uzwojeniu wtórnym przez które przenika przemienny strumień magnetyczny:

$$E_{2\text{sr}} = 4 f B_{max} s z_2, \quad (13)$$

gdzie: $E_{2\text{sr}}$ - wartość średnia napięcia indukowanego [V],
 f - częstotliwość napięcia [Hz],
 B_{max} - wartość maksymalna (szczytowa) indukcji magnetycznej [T],
 s - przekrój poprzeczny próbki [m²],
 z_2 - liczba zwojów uzwojenia wtórnego ($z_2 = 700$).

W aparacie Epsteina zamiast napięcia indukowanego $E_{2\text{sr}}$ mierzy się napięcie $U_{2\text{sr}}$ na zaciskach uzwojenia wtórnego (rys.3), należy więc uwzględnić zależność (7). Ostatecznie otrzymamy:

$$U_{2\text{sr}} = 4 f B_{max} s z_2 \frac{R_{obc}}{R_2 + R_{obc}}. \quad (14)$$

Dla uzyskania w próbce zadanej wartości indukcji maksymalnej B_{max} (np.: 1 T) należy tak wyregulować napięcie U_1 zasilające aparat Epsteina, aby woltomierz wartości średniej dołączony do uzwojenia wtórnego wskazywał wartość wyliczoną ze wzoru (14).

Woltomierze wartości średniej (tzw. prostownikowe) są zwykle wyskalowane dla wartości skutecznej przy napięciu sinusoidalnym, czyli wskazują wartość $1,111U_{sr}$ (uwzględniają współczynnik kształtu k dla sinusoidy). W takim przypadku dla uzyskania wartości średniej należy ich wskazania podzielić przez 1,111. Są również stosowane woltomierze prostownikowe wyskalowane bezpośrednio dla wartości średniej, ich wskazania nie wymagają więc przeliczania. Należy zwrócić uwagę, jaki rodzaj woltomierza wartości średniej jest stosowany podczas pomiarów!

Napięcie wtórne U_2 można również nastawiać na woltomierzu wartości skutecznej. Wzór (14) należy w tym celu obustronnie przemnożyć przez współczynnik kształtu $k = U_{sk} / U_{sr}$. Odpowiedni wzór przyjmie wtedy postać:

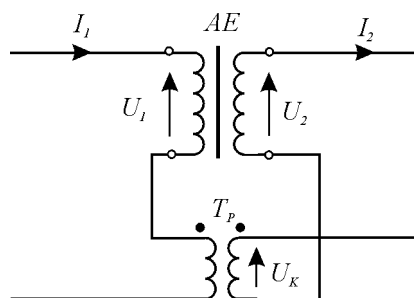
$$U_{2sk} = 4 k f B_{max} s z_2 \frac{R_{obc}}{R_2 + R_{obc}}. \quad (15)$$

Woltomierze wartości skutecznej (tzw. *True RMS*) są zwykle dokładniejsze od prostownikowych, jednak korzystanie ze wzoru (15) jest utrudnione, gdyż wyznaczenie aktualnej wartości współczynnika kształtu k i tak wymaga zastosowania woltomierza prostownikowego.

Wzory (13), (14), (15) nie są ściśle ze względu na przyrost napięcia E_2 wywołany strumieniem rozproszenia (indukcyjność L_2 na rys.3). Uzwojenie wtórne aparatu obejmuje bowiem nie tylko strumień w badanej próbce, ale również biegnący równoległe do niej niewielki strumień rozproszenia w powietrzu. Wpływ tego strumienia można wyznaczyć na podstawie pomiaru napięcia wtórnego indukowanego w aparacie bez próbki.

Norma [1] przewiduje kompensację wpływu strumienia rozproszenia za pomocą specjalnego transformatora powietrznego T_p , zwanego kompensatorem strumienia rozproszenia. Uzwojenie pierwotne kompensatora T_p włącza się szeregowo z uzwojeniem pierwotnym aparatu Epsteina AE , a jego uzwojenie wtórne szeregowo przeciwsobnie z uzwojeniem wtórnym aparatu (rys.6). Prąd I_1 magnesujący aparat Epsteina przepływając przez uzwojenie pierwotne kompensatora indukuje w jego uzwojeniu wtórnym napięcie które jest odejmowane od napięcia wtórnego U_2 aparatu Epsteina, kompensując wpływ strumienia

rozproszenia. Budowa kompensatora jest znormalizowana i tak dobrana, aby działanie strumienia rozproszenia w powietrzu było całkowicie skompensowane.



Rys.6. Zasada dołączania kompensatora strumienia rozproszenia

Przy posługiwaniu się wzorem (14) należy znać przekrój poprzeczny s próbki. Nie można go wyznaczyć bezpośrednio przez pomiar szerokości i grubości pakietu blach, gdyż blachy te posiadają warstwę izolacji, a ponadto ich powierzchnia wykazuje pewną falistość. Dlatego przekrój próbki s [m²] oblicza się na podstawie masy netto m [kg] próbki, jej gęstości ρ [kg/m³] oraz łącznej długości pakietów blach $4l$ [m]:

$$s = \frac{m}{4 \cdot l \cdot \rho}, \quad (16)$$

Gęstość ρ można wyznaczyć doświadczalnie metodą piknometru, albo obliczyć na podstawie podanej przez producenta zawartości krzemu i aluminium, ze wzoru:

$$\rho = 7865 - 65(M - 1,7N), \quad (17)$$

gdzie: M – procentowa zawartość krzemu w blachach, % wagowo,

N – procentowa zawartość aluminium w blachach, % wagowo.

Wartość M wynosi przeciętnie od 0,5 do 4,5 %, a wartość N od 0 do 5 %. Łączna długość pakietów blach wynosi $4 \cdot 0,28$ m.

2.6. Wpływ częstotliwości i kształtu krzywej

Pomiary stratności powinny być wykonywane przy zadanej częstotliwości f (zwykle 50 Hz), stąd w układzie pomiarowym potrzebny jest częstotściomierz i powinna być możliwość regulacji częstotliwości.

Natomiast kształt krzywej napięcia powinien być sinusoidalny, co bywa trudne do osiągnięcia, szczególnie przy dużych wartościach indukcji magnetycznej, ze względu na silne odkształcenia prądu magnesującego rdzeń w okolicy jego nasycania się. Wyższe harmoniczne prądu magnesującego wywołują spadki napięć na impedancji źródła, stąd napięcie zasilające aparat Epsteina zostaje odkształcone.

Dla zminimalizowania tych odkształceń impedancja źródła zasilającego aparat Epsteina powinna być możliwie mała i niedopuszczalna jest regulacja napięcia układami oporowymi. Jako źródła napięcia o regulowanej częstotliwości mogą być stosowane układy elektromaszynowe lub regulowane elektroniczne generatory, dla których zaleca się moc co najmniej 200 VA.

Według normy [1] dopuszczalny jest współczynnik kształtu k różniący się od wartości 1,111 nie więcej niż o 1 %. Jeśli różnica jest większa, należy wprowadzić korektę zmierzonych strat magnetycznych dla sprowadzenia ich do współczynnika 1,111. Korekta opiera się na założeniu, że straty histerezy nie zależą od kształtu krzywej, natomiast wiropądowe są proporcjonalne do kwadratu współczynnika kształtu k (1):

$$P_{Fe(1,111)} = P_h + P_{w(k)} \left(\frac{1,111}{k} \right)^2 = P_{Fe(k)} + \Delta_{(k)} P_{Fe} , \quad (18a)$$

gdzie poprawka $\Delta_{(k)} P_{Fe}$ jest równa:

$$\Delta_{(k)} P_{Fe} = P_{w(k)} \left(\left(\frac{1,111}{k} \right)^2 - 1 \right) . \quad (18b)$$

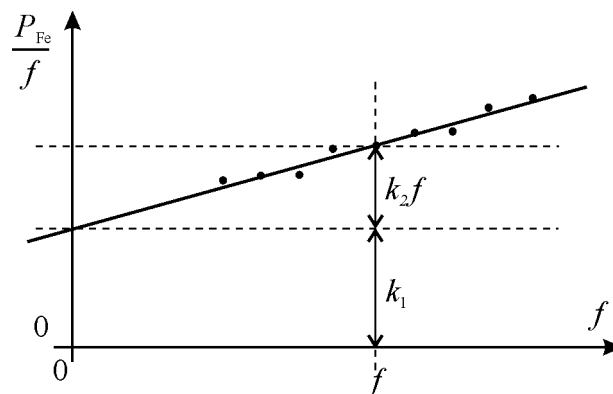
Jeśli współczynnik kształtu różni się od 1,111 więcej niż o 5 %, pomiarów nie wykonuje się. Dla umożliwienia wyznaczania współczynnika kształtu, dodatkowo włączany jest woltomierz wartości skutecznej (np. elektrodynamiczny) równolegle z woltomierzem prostownikowym. Przy pomiarze mocy strat woltomierz wartości skutecznej należy odłączyć od układu dla zmniejszenia poprawki mocy (8).

2.7. Rozdział strat magnetycznych

Korzystanie ze wzorów (18a) i (18b) wymaga znajomości rozdziału mierzonych strat w żelazie P_{Fe} na histerezowe P_h i wiropądowe P_w . Analizując postać zależności (1) można dokonać rozdziału strat stosując metodę zmiennej częstotliwości albo zmiennego współczynnika kształtu.

2.7.1. Metoda zmiennej częstotliwości

Metoda zmiennej częstotliwości wykorzystuje fakt, że straty histerezowe P_h są wprost proporcjonalne do częstotliwości f , a straty wiropądowe P_w zależą od kwadratu częstotliwości f^2 , zgodnie z zależnością (1). Rozdział strat metodą zmiennej częstotliwości polega więc na wykonaniu serii pomiarów przy stałej wartości indukcji B_{max} i sinusoidalnym kształcie napięcia (stała wartość współczynnika kształtu $k=1,111$) oraz przy różnych częstotliwościach f . Następnie oblicza się dla każdego pomiaru iloraz P_{Fe}/f i sporządza się wykres P_{Fe}/f w funkcji częstotliwości f (rys.7).



Rys.7. Rozdział strat metodą zmiennej częstotliwości

Upraszczając postać (1), zależność strat P_{Fe} od częstotliwości f można wyrazić wzorem:

$$P_{Fe} = P_h + P_w = k_1 f + k_2 f^2 , \quad (19)$$

wobec tego obliczany iloraz jest równy:

$$\frac{P_{Fe}}{f} = k_1 + k_2 f . \quad (20)$$

Wykres zależności (20) jest więc linią prostą, tak jak na rys. 7. Wykres zgodnie ze wzorem (20) wskaże przy $f = 0$ wartość współczynnika k_1 określającego straty histerezy:

$$P_h = k_1 f . \quad (21a)$$

Straty wiropądowe dla częstotliwości f (np. 50 Hz) przedstawia na wykresie odcinek $k_2 f$, stąd:

$$P_w = k_2 f \cdot f . \quad (21b)$$

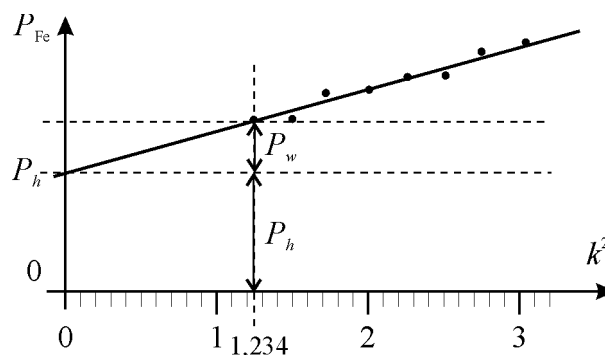
Należy zwrócić uwagę, że postać wykresu na rys.7 jest wynikiem przekształceń matematycznych i nie ma wprost interpretacji fizycznej. W szczególności dla częstotliwości $f = 0$ (czyli dla prądu stałego) straty zarówno histerezy jak i wiropądowe nie występują, ponieważ nie zachodzi przemagnesowywanie rdzenia zmiennym polem magnetycznym.

2.7.2. Metoda zmiennego współczynnika kształtu

Metoda zmiennego współczynnika kształtu wykorzystuje fakt, że straty histerezy P_h są niezależne od współczynnika kształtu k , a straty wiropądowe P_w zależą od jego kwadratu k^2 , zgodnie z zależnością (1). Rozdział strat metodą zmiennego współczynnika kształtu polega więc na wykonaniu serii pomiarów przy stałej wartości indukcji B_{max} i stałej wartości częstotliwości f oraz przy zmiennym współczynniku kształtu k . Upraszczając postać (1), zależność strat P_{Fe} od współczynnika kształtu k można wyrazić wzorem:

$$P_{Fe} = P_h + P_w \left(\frac{k}{1,111} \right)^2 , \quad (22)$$

Wyniki pomiarów przedstawia się na wykresie w funkcji k^2 , jak na rys. 8. Wykres jest linią prostą, która w teoretycznym punkcie $k^2 = 0$ wyznacza, zgodnie ze wzorem (22), wartość strat histerezy przy danej indukcji i częstotliwości. W punkcie $k^2 = 1,111^2 = 1,234$ można odczytać z wykresu obydwie składowe straty dla napięcia sinusoidalnego.



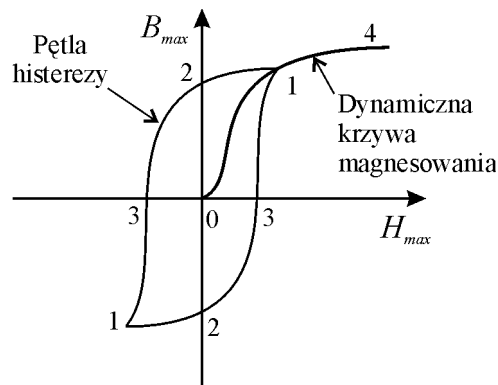
Rys.8. Rozdział strat metodą zmiennego współczynnika kształtu krzywej napięcia

Zmianę kształtu napięcia zasilającego aparat Epsteina można uzyskiwać przez włączanie w obwód po stronie pierwotnej elementu nieliniowego, np. nasycającego się dławika. Pożądany efekt można również uzyskać po włączeniu rezystora wykorzystując fakt, że sam aparat Epsteina jest elementem nieliniowym i prąd zasilający I_1 jest silnie odkształcony, a więc przepływając przez włączony szeregowo rezystor odkształca również napięcie zasilające U_1 .

2.8. Wyznaczanie dynamicznej krzywej magnesowania

Dzięki dobrej przewodności magnetycznej w narożach aparatu Epsteina 25 cm wartość indukcji wzdłuż obwodu magnetycznego jest wyrównana, co pozwala na wyznaczenie

dynamicznej krzywej magnesowania $B_{max} = f(H_{max})$ przy prądzie przemiennym, tzn. zależności maksymalnej wartości indukcji magnetycznej B_{max} od maksymalnej wartości natężenia pola magnetycznego H_{max} , podczas przemagnesowywania rdzenia przemiennym sinusoidalnym polem magnetycznym. Przykładowy kształt dynamicznej krzywej magnesowania oraz pętli histerezy przedstawia rys.9. Dynamiczna krzywa magnesowania powstaje jako połączenie wierzchołków 1 pętli histerezy. Punkty 2 pętli histerezy określają pozostałość magnetyczną, a punkty 3 wyznaczają natężenie koercji. Dynamiczna krzywa magnesowania rozpoczyna się w początku układu współrzędnych 0-0 i osiąga nasycenie 4.



Rys.9. Dynamiczna krzywa magnesowania i pętla histerezy ferromagnetyka

Wartość maksymalną indukcji magnetycznej B_{max} w próbce oblicza się na podstawie przekształconego wzoru (14):

$$B_{max} = \frac{U_{2\acute{s}r}}{4 f s z_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_{obc}} \right) . \quad (23)$$

Wartość maksymalną natężenia pola magnetycznego oblicza się na podstawie wartości maksymalnej prądu magnesującego I_{1max} :

$$H_{max} = \frac{I_{1max} z_1}{l_m} , \quad (24)$$

gdzie: H_{max} - wartość maksymalna natężenia pola magnetycznego [A/m],

I_{1max} - wartość maksymalna prądu w uzwojeniu pierwotnym [A],

z_1 - liczba zwojów uzwojenia pierwotnego ($z_1 = 700$),

l_m - umowna efektywna długość drogi strumienia magnetycznego ($l_m = 0,94m$).

Wartość maksymalną prądu magnesującego I_{1max} płynącego w uzwojeniu pierwotnym aparatu Epstein'a mierzy się za pomocą transformatora powietrznego o znanej indukcyjności wzajemnej M_D , który jest przetwornikiem maksymalnej wartości prądu pierwotnego na wartość średnią napięcia wtórnego, zgodnie z normą [1].

Zasadę pomiaru wartość maksymalnej prądu I_{1max} przedstawiano na rys.10. Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym transformatora powietrznego jest równe:

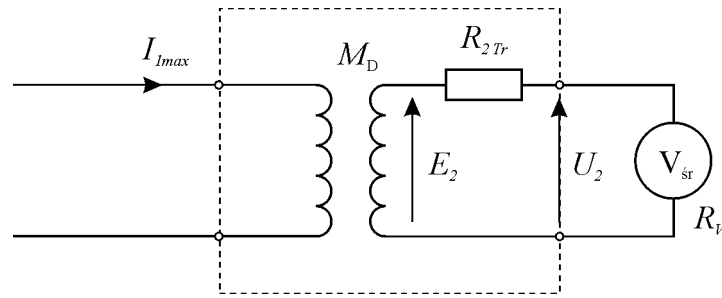
$$E_{2Tr\acute{s}r} = 4 f M_D I_{1max} , \quad (25)$$

gdzie: $E_{2Tr\acute{s}r}$ - wartość średnia napięcia indukowanego w uzwojeniu wtórnym [V],

f - częstotliwość prądu magnesującego pierwotnego [Hz],

M_D - indukcyjność wzajemna transformatora powietrznego [H],

I_{1max} - wartość maksymalna prądu w uzwojeniu pierwotnym [A].



Rys.10. Zasada pomiaru wartości maksymalnej prądu za pomocą transformatora powietrznego

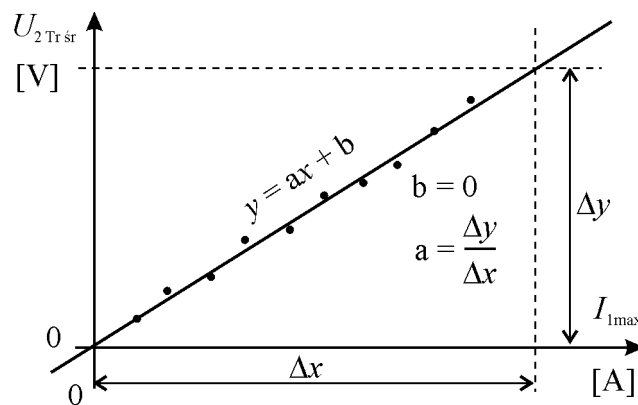
Podstawiając do wzoru (25) napięcie $U_{2Tr\ sr}$ mierzone woltomierzem wartości średniej, należy uwzględnić wpływ rezystancji R_{2Tr} uzwojenia wtórnego transformatora i rezystancji woltomierza R_V (podobnie jak w punkcie 2.5):

$$U_{2Tr\ sr} = E_{2Tr\ sr} \frac{R_V}{R_V + R_{2Tr}} \quad (26)$$

Z zależności (24), (25), (26) po przekształceniach otrzymuje się ostateczny wzór do obliczania H_{max} dla charakterystyki magnesowania:

$$H_{max} = \frac{z_1}{4fM_D l_m} \cdot \left(1 + \frac{R_{2Tr}}{R_V}\right) \cdot U_{2Tr\ sr} \quad (27)$$

Przy stosowaniu tego wzoru musi być znana indukcyjność wzajemna M_D transformatora powietrznego. Można ją wyznaczyć doświadczalnie na podstawie charakterystyki $U_{2Tr\ sr} = f(I_{1max})$ transformatora (rys.11). W tym celu należy wykonać kilka pomiarów wartości średniej napięcia indukowanego $U_{2Tr\ sr}$ przy sinusoidalnym prądzie magnesującym, którego wartość maksymalną I_{1max} uzyskuje się mierząc jego wartość skuteczną I_{1sk} i mnożąc ją przez współczynnik szczytu dla sinusoidy, równy $\sqrt{2} = 1,414$.



Rys.11. Charakterystyka transformatora powietrznego

Z otrzymanych pomiarów wykreśla się w skali charakterystykę $U_{2Tr\ sr} = f(I_{1max})$, aproksymując ją linią prostą $y=ax+b$ przechodzącą przez początek układu współrzędnych (gdyż dla $I_{1max} = 0$ na pewno $U_{2Tr\ sr} = 0$). Z otrzymanego wykresu (rys.11) odczytuje się współczynnik kierunkowy a prostej aproksymującej, w [V/A] (oczywiście wyraz wolny $b=0$). Przekształcając wzór (25) i uwzględniając (26) otrzymujemy wzór (28) na indukcyjność wzajemną M_D transformatora powietrznego, której wartość wykorzystujemy następnie do obliczeń według wzoru (27):

$$M_D = \frac{U_{2sr}}{I_{1max}} \cdot \frac{1}{4f} \cdot \left(1 + \frac{R_{2Tr}}{R_V}\right) = a \cdot \frac{1}{4f} \cdot \left(1 + \frac{R_{2Tr}}{R_V}\right). \quad (28)$$

Należy zauważyć, że transformator powietrzny jest elementem liniowym, w odróżnieniu od transformatorów posiadających rdzeń ferromagnetyczny. Dlatego wyznaczając charakterystykę przetwarzania transformatora powietrznego (rys.11) uzasadnione jest aproksymowanie jej linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Jeśli punkty uzyskane z pomiarów nie układają się zgodnie z oczekiwaniami, prawdopodobnie pomiary zostały źle wykonane, np.: nie wyzerowano mierników przed pomiarami, odczytywano wskazania z nieodpowiedniej skali, kształt prądu magnesującego nie był sinusoidalny lub zmieniał się w czasie pomiarów itp.

3. Przykładowe właściwości blach transformatorowych

W tabeli przedstawiono przykładowe parametry nowoczesnych blach elektrotechnicznych jednego z polskich producentów wyrobów stalowych [7]. Do najważniejszych parametrów decydujących o jakości blachy elektrotechnicznej należą: stratność przy częstotliwości 50 Hz i indukcji 1,7 T oraz minimalna indukcja magnetyczna przy natężeniu pola $H=800$ A/m.

Należy zwrócić uwagę, że próbka wykorzystywana do pomiarów w ćwiczeniu pochodzi z blach elektrotechnicznych starszej produkcji, należy więc liczyć się z jej gorszymi parametrami: większą stratnością i mniejszą indukcją przy zadanym natężeniu pola magnetycznego. Wymagania dla blach i taśm elektrotechnicznych produkowanych współcześnie są znormalizowane [2], [3].

Wybrane parametry blach elektrotechnicznych [7]

Grubość Thickness	Gatunek handlowy Commercial grade	Gatunek wg normy EN 10107:2005 Grade according to EN 10107:2005 standard	Maksymalna stratność całkowita przy 50 Hz i przy 1,7T Maximum specific total core loss at 50 Hz at 1,7T	Typowa stratność całkowita przy 50 Hz i przy 1,7T Typical specific total core loss at 50 Hz at 1,7T	Minimalna indukcja magnetyczna przy $H=800$ A/m Minimum magnetic induction for $H=800$ A/m	Typowa indukcja magnetyczna przy $H=800$ A/m Typical magnetic induction for $H=800$ A/m
mm			W/kg	W/kg	T	T
0,23	ET 110-23	M110-23S	1,10	1,08	1,84	1,87
	ET 120-23	M120-23S	1,20	1,14	1,84	1,87
0,27	ET 114-27		1,14	1,11	1,83	1,88
	ET 120-27	M120-27S	1,20	1,17	1,82	1,86
	ET 130-27	M130-27S	1,30	1,23	1,80	1,85
	ET 140-27	M140-27S	1,40	1,34	1,77	1,84
0,30	ET 117-30		1,17	1,15	1,85	1,88
	ET 122-30		1,22	1,19	1,83	1,87
	ET 130-30	M130-30S	1,30	1,25	1,82	1,86
	ET 140-30	M140-30S	1,40	1,34	1,80	1,84
	ET 150-30	M150-30S	1,50	1,44	1,75	1,81
0,35	ET 130-35		1,30	1,27	1,84	1,87
	ET 140-35	M140-35S	1,40	1,34	1,83	1,86
	ET 150-35	M150-35S	1,50	1,44	1,80	1,84
	ET 165-35	M165-35S	1,65	1,55	1,75	1,78

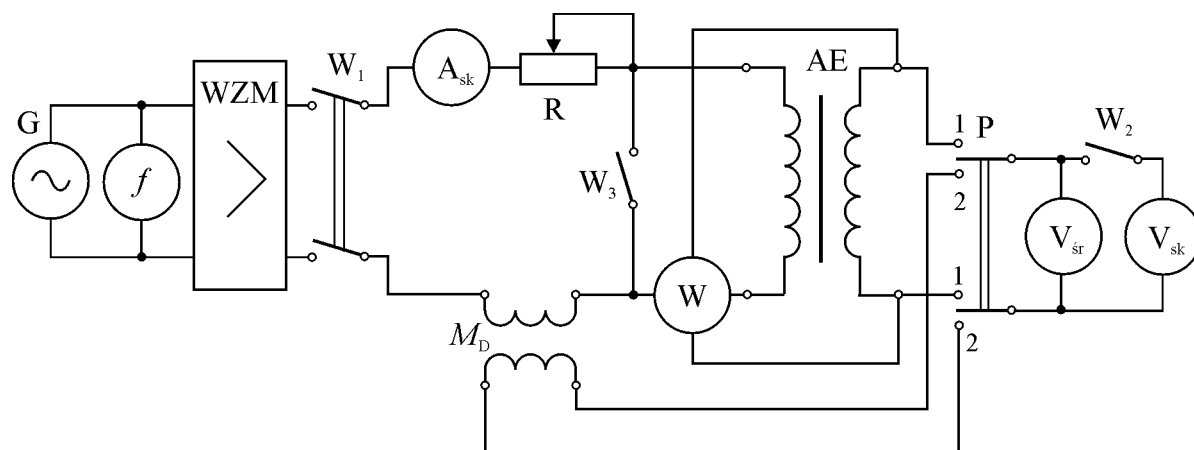
4. Opis stanowiska pomiarowego

4.1. Układ zasilania aparatu Epsteina

Układ zasilania aparatu Epsteina stosowany w ćwiczeniu składa się z generatora napięcia sinusoidalnego o regulowanej częstotliwości i amplitudzie oraz ze wzmacniacza dużej mocy. Dodatkowym wyposażeniem jest częstotlicznik cyfrowy. W przypadku zastosowania generatora z cyfrowym nastawieniem częstotliwości używanie częstotlicznika jest zbędne. W takim przypadku można go nie stosować w układzie zasilania aparatu Epsteina.

4.2. Schemat układu pomiarowego aparatu Epsteina

Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego w ćwiczeniu przedstawiono na rys.12. Generator G , częstotlicznik f i wzmacniacz mocy WZM stanowią źródło zasilania aparatu Epsteina. Łącznik W_1 umożliwia odłączenie napięcia zasilającego podczas zmian w konfiguracji układu. Łącznik W_2 umożliwia odłączenie woltomierza wartości skutecznej na czas ustawiania wartości indukcyjności magnetycznej w próbce. Transformator powietrzny M_D służy do pomiaru wartości maksymalnego prądu magnesującego. Woltomierz wartości średniej umożliwia ustawienie indukcyjności w próbce, a woltomierz wartości skutecznej służy do wyznaczenia współczynnika kształtu napięcia. Zastosowanie przełącznika P umożliwia pomiar napięcia średniego z transformatora powietrznego lub z aparatu Epsteina.



Rys.12. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego z aparatem Epsteina

Oznaczenia:

- G – generator napięcia sinusoidalnego,
- f – częstotlicznik cyfrowy (opcjonalnie),
- WZM – wzmacniacz mocy,
- A_{sk} – amperomierz wartości skutecznej,
- R – rezystor regulacyjny,
- W – watomierz elektrodynamiczny,
- AE – aparat Epsteina,
- M_D – transformator powietrzny do pomiaru prądu maksymalnego,
- V_{sr} – woltomierz wartości średniej,
- V_{sk} – woltomierz wartości skutecznej,
- W_1, W_2, W_3 – łączniki do konfigurowania układu pomiarowego,
- P – przełącznik dwubiegunowy.

Należy zwrócić uwagę, że schemat ten nie jest całkowicie zgodny z zalecanym w normie [1]. Zastosowano dodatkowy rezystor regulacyjny R oraz łącznik W_3 , które umożliwiają przeprowadzenie skalowania transformatora powietrznego oraz badania parametrów próbki

aparatem Epsteina w tym samym układzie. Szczegółowy sposób posługiwania się poszczególnymi elementami układu pomiarowego przedstawiono w opisie wykonywanych pomiarów.

W obliczeniach należy uwzględnić następujące wartości parametrów układu pomiarowego:

- Masa brutto próbki (razem z izolacją) $m_c = 1,97$ kg
- Udział wagowy izolacji $i = 0,5$ %
- Zawartość krzemu w próbce $M = 3$ %
- Zawartość aluminium w próbce $N = 0$ % (zero – brak aluminium w składzie)
- Rezystancja uzwojenia wtórnego aparatu Epsteina $R_2 = 2,13$ Ω
- Rezystancja uzwojenia wtórnego transformatora powietrznego $R_{2Tr} = 660$ Ω
- Rezystancja woltomierza wartości średniej na zakresie 75 V $R_V = 25$ k Ω
- Rezystancja toru napięciowego watomierza na zakresie 75 V $R_{wn} = 15$ k Ω
- Rezystancja toru napięciowego watomierza na zakresie 150 V $R_{wn} = 30$ k Ω

Wartości pozostałych parametrów koniecznych do przeprowadzenia obliczeń zostały podane we wcześniejszej części instrukcji.

4.3. Instrukcja uruchamiania i eksploatacji stanowiska pomiarowego aparatu Epsteina

1. Przygotowanie do uruchomienia stanowiska

Przy **wyłączonym** zasilaniu stanowiska sprawdzić ustawienia wstępne aparatury:

- ustawienia generatora: zasilanie **wyłączone**, zakres częstotliwości 20-200 Hz, ustawiona częstotliwość 50 Hz, zakres napięcia wyjściowego 10 V, poziom napięcia wyjściowego ustawiony na minimum,
- ustawienia wzmacniacza (Układ Zasilania Aparatu Epsteina): zasilanie **wyłączone**, zakres napięcia wyjściowego: 25 V+17 V+17 V, wejście dołączone do wyjścia generatora 10 V,
- ustawienia częstotliciomierza cyfrowego: zasilanie **wyłączone**,
- łączniki W_1, W_2, W_3 – wszystkie w pozycji otwartej WYŁ,
- przełącznik P w pozycji 1-1,
- rezystory regulacyjne ustawione na maksymalną wartość,
- woltomierze V_1, V_2 na zakresie 75 V – **nie zmieniać w czasie całego ćwiczenia!**
- amperomierz A na zakresie 1 A – **nie zmieniać w czasie całego ćwiczenia!**
- watomierz W na zakresach 1 A i 300 V, w czasie ćwiczenia dobierać odpowiednio zakres napięciowy, **nie zmieniać zakresu prądowego!**

2. Uruchamianie stanowiska

Po pozytywnym sprawdzeniu stanu stanowiska przystąpić do jego uruchomienia według następującej kolejności:

- załączyć zasilanie stanowiska,
- załączyć zasilanie częstotliciomierza (jeśli jest stosowany),
- załączyć zasilanie generatora, odczekać na ustabilizowanie się sygnału wyjściowego, skontrolować częstotliwość sygnału 50 Hz częstotliciomierzem cyfrowym, ustawić sygnał generatora na **minimum**,
- załączyć zasilanie wzmacniacza (Układ Zasilania Aparatu Epsteina),
- zamknąć łącznik W_1 ,
- powoli zwiększać napięcie na generatorze (do ok.4 V) i ustawić prąd na amperomierzu około 0,1 A, ewentualnie skorygować częstotliwość na 50 Hz,
- sprawdzić, czy wszystkie mierniki wychylają się, przybliżone wskazania powinny być zbliżone do następujących wartości: watomierz: ok. 5 dz., Uśr: ok. 18 V, Usk: ok. 19 V (przy zamkniętym tylko na czas odczytu łącznika W_2), po przełączeniu przełącznika P w pozycję 2-2 Uśr ok. 5 V,

- jeśli sprawdzenie wypadło pomyślnie, zmniejszyć napięcie generatora do minimum, otworzyć łącznik W_1 i skonfigurować ustawienia układu pomiarowego do pierwszego punktu programu ćwiczenia.

- **UWAGA!** Podczas wykonywania ćwiczenia **nie wyłączać zasilania** generatora i wzmacniacza. Na czas zmiany konfiguracji układu pomiarowego pomiędzy realizacją kolejnych punktów programu ćwiczenia należy zmniejszać do **minimum** napięcie na generatorze i **otwierać** łącznik W_1 .

3. Wyłączanie stanowiska po pomiarach

Po zrealizowaniu ostatniego punktu programu ćwiczenia należy wyłączać aparaturę w następującej kolejności:

- zmniejszyć napięcie generatora do minimum,
- otworzyć łącznik W_1 ,
- wyłączyć zasilanie wzmacniacza,
- wyłączyć zasilanie generatora,
- wyłączyć zasilanie częstotściomierza,
- wyłączyć zasilanie stanowiska,
- skonfigurować stanowisko zgodnie z ustawieniami opisanymi w punkcie 1.

5. Wykonanie ćwiczenia

5.1. Przygotowanie stanowiska do pomiarów

5.1.1. Zanotować do protokołu parametry wykorzystywanej aparatury stosując oznaczenia zgodnie ze schematem na rys.12. Zwrócić szczególną uwagę na sposób zapisu wartości rezystancji torów prądowych i napięciowych wykorzystywanych przyrządów pomiarowych. Dla uniknięcia pomyłki należy w protokole zapisać te wartości przede wszystkim w postaci podanej przez producenta miernika, a następnie przeliczyć odpowiednio do wykorzystywanych zakresów pomiarowych. Bardzo ważnym parametrem jest znamionowy współczynnik mocy watomierza $\cos \varphi_{zn}$, którego wartość należy uwzględnić przy obliczaniu stałej watomierza k_w .

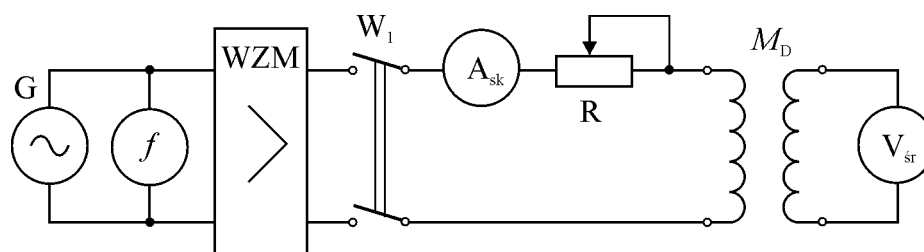
5.1.2. Zapoznać się z „Instrukcją uruchamiania i eksploatacji stanowiska pomiarowego aparatu Epsteina”, zawartą w punkcie 4.3.

5.1.3. Przygotować stanowisko do uruchomienia według pkt. 1 w/w instrukcji.

5.1.4. Uruchomić stanowisko według pkt. 2 w/w instrukcji.

5.2. Skalowanie transformatora powietrznego

5.2.1. Skonfigurować układ pomiarowy stanowiska z rys.12 odpowiednio do przeprowadzenia skalowania transformatora powietrznego według schematu przedstawionego na rys.13.



Rys.13. Układ do skalowania transformatora powietrznego

W tym celu należy:

- zewrzeć uzwojenie pierwotne aparatu Epsteina, łącznik W_3 **zamknięty** (ZAŁ),
- ustawić rezystor regulacyjny na **maksymalną** wartość,
- ustawić przełącznik P w pozycji 2-2, łącznik W_2 **otwarty** (WYŁ).

5.2.2. Ustawić na generatorze częstotliwość napięcia $f = 50$ Hz. Wyznaczyć kilka punktów (ok. 10) charakterystyki transformatora powietrznego $U_{2Tr\acute{s}r} = f(I_{1max})$, przy sinusoidalnym prądzie pierwotnym I_{1sk} zmienianym z równym krokiem w zakresie od 0 do ok. 1 A. Wartość prądu należy regulować poprzez zmianę napięcia wyjściowego z generatora. Wartość średnią napięcia indukowanego $U_{2Tr\acute{s}r}$ transformatora odczytywać z woltomierza prostownikowego. Wartość maksymalną pierwotnego prądu magnesującego I_{1max} obliczyć na podstawie jego zmierzonej wartości skutecznej I_{1sk} , mnożąc ją przez współczynnik szczytu dla sinusoidy równy $\sqrt{2} = 1,414$. Wyniki pomiarów i obliczeń zapisywać w tab.1.

Tab.1. Skalowanie transformatora powietrznego

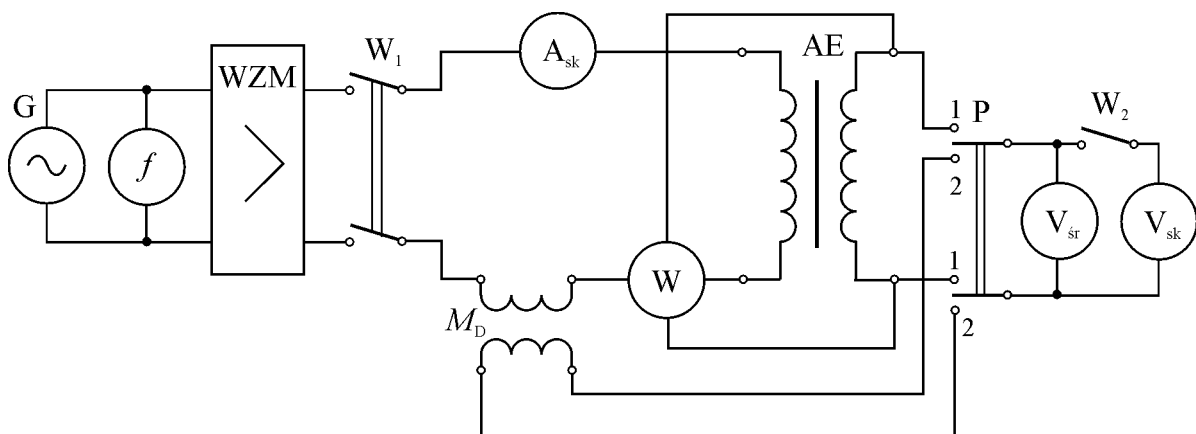
lp	Nastawy		Odczyty	Obliczenia		
	I_{1sk}	f	$U_{2Tr\acute{s}r}$	I_{1max}	a	M_D
	A	Hz	V	A	V/A	H

5.2.3. Wykreślić w skali charakterystykę $U_{2Tr\acute{s}r} = f(I_{1max})$, aproksymując ją linią prostą $y = ax + b$ przechodzącą przez początek układu współrzędnych ($b = 0$). Z otrzymanego wykresu (porównać z rys.11) odczytać współczynnik kierunkowy a prostej aproksymującej, w [V/A]. Obliczyć indukcyjność wzajemną M_D transformatora powietrznego według wzoru (28) i zapisać w tab.1.

5.3. Wyznaczanie dynamicznej krzywej magnesowania

5.3.1. Skonfigurować układ pomiarowy stanowiska z rys.12 odpowiednio do wyznaczania dynamicznej krzywej magnesowania próbki umieszczonej w aparacie Epsteina według schematu przedstawionego na rys.14. W tym celu należy:

- **zawrzeć** rezystory regulacyjne ustawiając odpowiednio ich suwaki,
- ustawić łącznik W_2 **otwarty** (WYŁ) oraz łącznik W_3 również **otwarty** (WYŁ),
- przełącznik P ustawiać odpowiednio w pozycji 1-1 lub 2-2 zgodnie z dalszą instrukcją.



Rys.14. Układ do wyznaczania dynamicznej krzywej magnesowania i pomiaru strat magnetycznych

5.3.2. Wyznaczyć kilkanaście punktów dynamicznej krzywej magnesowania $B_{max} = f(H_{max})$ badanej próbki w aparacie Epsteina, dla prądu pierwotnego I_{1sk} o wartości skutecznej od 0 do ok. 1 A. Należy zwrócić uwagę, aby:

-wyznaczanie dynamicznej krzywej magnesowania badanej próbki wykonać dla częstotliwości napięcia z generatora $f= 50$ Hz,

-ze względu na nieliniowość charakterystyki (porównać z rys.9) prądy mniejsze niż 0,3 A (bardziej stroma część charakterystyki) ustawiać z mniejszym krokiem (np.: co 0,05 A), a prądy większe od 0,3 A (płaska część charakterystyki) z krokiem większym (np.: co 0,1 A),

- wartość prądu regulować poprzez zmianę napięcia wyjściowego z generatora,

- podczas pomiarów nie przekroczyć zakresu 75 V dla woltomierza napięcia średniego, dlatego zależnie od rodzaju próbki włożonej do aparatu Epsteina może okazać się konieczne ograniczenie pomiarów do mniejszych wartości prądu (około 0,6 – 0,7 A).

Maksymalną wartości indukcji magnetycznej B_{max} należy obliczać według wzoru (23) na podstawie napięcia $U_{2\text{sr}}$ odczytywanego z woltomierza wartości średniej przy przełączniku P ustawionym w pozycji 1-1.

Maksymalną wartości natężenia pola magnetycznego H_{max} należy obliczać według wzoru (27) na podstawie napięcia $U_{2\text{Trsr}}$ odczytywanego z woltomierza wartości średniej przy przełączniku P ustawionym w pozycji 2-2. Indukcyjność wzajemną M_D transformatora powietrznego przyjąć na podstawie pomiarów i obliczeń z punktu 5.2.

Wskaźnik woltomierza w tym punkcie nie trzeba odczytywać, należy tylko ustawić bezpieczne zakresy prądu i napięcia, wg punktu 4.3. Woltomierz wartości skutecznej w tym punkcie powinien być odłączony (W_2 otwarty).

Należy zwrócić uwagę, aby nie wykorzystywać do obliczeń wartości prądu I_{1sk} ustawianego na amperomierzu wartości skutecznej! Prąd ten jest odkształcony, niesinusoidalny i nie można (w prosty sposób) na jego podstawie wyznaczyć maksymalnej wartości natężenia pola magnetycznego H_{max} .

Wyniki pomiarów i obliczeń zapisywać do tab. 2.

5.3.3. Na podstawie wyznaczonych punktów B_{max} i H_{max} wykreślić dynamiczną krzywą magnesowania $B_{max} = f(H_{max})$, należy przy tym pamiętać, że krzywa magnesowania zaczyna się w początku układu współrzędnych. Porównać otrzymany kształt charakterystyki z rys.9.

Tab.2. Wyznaczanie dynamicznej krzywej magnesowania

lp	Nastawy		Odczyty		Obliczenia		
	I_{1sk}	f	$U_{2\text{sr}}(1-1)$	$U_{2\text{Trsr}}(2-2)$	I_{1max}	H_{max}	B_{max}
	A	Hz	V	V	A	A/m	T

5.4. Pomiary stratności magnetycznej

5.4.1. Skonfigurować układ pomiarowy stanowiska z rys.12 odpowiednio do pomiaru stratności magnetycznej próbki umieszczonej w aparacie Epsteina według schematu przedstawionego na rys.14. W tym celu należy:

- **zewrzeć** rezystory regulacyjne ustawiając odpowiednio ich suwaki,

- ustawić łącznik W_3 **otwarty** (WYŁ),

- ustawić przełącznik P w pozycji 1-1,

- ustawić łącznik W_2 początkowo **otwarty** (WYŁ), a potem odpowiednio zamykać go na czas pomiaru wartości skutecznej napięcia wtórnego, zgodnie z dalszą instrukcją postępowania (pkt. 5.4.3).

5.4.2. Wykonać pomiary stratności magnetycznej przy indukcji $B_{max} = 1$ T oraz $B_{max} = 1,5$ T i częstotliwości napięcia $f=50$ Hz.

Uwaga: dla obydwu wartości indukcji należy obliczyć **przed ćwiczeniami** odpowiadające im wartości napięcia $U_{2\ sr}$ wg wzoru (14), na podstawie danych aparatu Epsteina zawartych w punkcie 4.2. Kolejność obliczeń jest następująca: masa netto próbki (10), masa efektywna próbki (12), gęstość próbki (17), przekrój próbki (16), napięcie indukowane (14), straty (8), stratność (11).

Zakres prądowy watomierza należy ustawić na 1 A, zakres napięciowy odpowiednio do wychylenia watomierza na 75 V lub 150 V. Przy obliczaniu stałej watomierza pamiętać o znamionowym współczynniku mocy watomierza $\cos\varphi_{zn}=0,1$. Wskazanie watomierza i woltomierza prostownikowego należy odczytywać przy **otwartym** łączniku W_2 .

Wyniki pomiarów i obliczeń zapisywać do tab.3.

Tab.3. Pomiar stratności magnetycznej

lp	Nastawy			Ustawienia watomierza				Odczyty			Obliczenia	
	B_{max}	$U_{2\ sr(1-1)}$	f	I_{zn}	U_{zn}	$\cos\varphi_{zn}$	k_w	α_w	P_m	I_{1sk}	P_{Fe}	p_{Fe}
	T	V	Hz	A	V	-	W/dz	dz	W	A	W	W/kg

5.4.3. Wyznaczyć współczynnik kształtu napięcia wtórnego przy indukcji $B_{max} = 1$ T oraz $B_{max} = 1,5$ T (te same wartości co w punkcie 5.4.2). W tym celu należy **jednocześnie** odczytać $U_{2\ sr}$ i $U_{2\ sk}$ z woltomierzy V1 i V2 przy **zamkniętym** łączniku W_2 i przełączniku P w pozycji 1-1. Napięcie średnie $U_{2\ sr}$ zmienia się przy zamykaniu łącznika W_2 , dlatego należy zmierzyć je dwukrotnie: pierwszy raz przy ustawianiu wartości indukcji B_{max} (przy otwartym W_2 , tak jak w punkcie 5.4.2.) i drugi raz dla wyznaczenia współczynnika kształtu (przy zamkniętym W_2). Wyniki pomiarów i obliczeń zapisywać do tab.4.

Uwaga: dla oszczędności czasu punkt ten można wykonywać jednocześnie z punktem poprzednim, zapisując wyniki kolejno w obu tabelkach po ustawieniu wymaganej wartości indukcji i odpowiednio posługując się łącznikiem W_2 .

Tab.4. Wyznaczanie współczynnika kształtu napięcia wtórnego U_2

lp	Nastawy - W_2 otwarty			Odczyty - W_2 zamknięty		Obliczenia
	B_{max}	$U_{2\ sr(1-1)}$	f	$U_{2\ sr(1-1)}$	$U_{2\ sk}$	k
	T	V	Hz	V	V	-

5.5. Rozdział strat metodą zmiennej częstotliwości

5.5.1. Skonfigurować układ pomiarowy stanowiska z rys.12 tak samo jak do pomiaru stratności magnetycznej próbki w punkcie poprzednim.

5.5.2. Wyznaczyć rozdział strat metodą zmiennej częstotliwości przy indukcji $B_m=1$ T i następujących częstotliwościach napięcia zasilającego: 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 70 Hz. Wartości napięć $U_{2\ sr}$ dla poszczególnych punktów pomiarowych należy obliczyć przed ćwiczeniami wg wzoru (14), podobnie jak w punkcie 5.4.2.

Watomierz należy ustawić na zakresy: 1 A i 75 V. Przy obliczaniu stałej watomierza pamiętać o znamionowym współczynniku mocy watomierza $\cos\varphi_{zn}=0,1$.

Wyniki pomiarów i obliczeń zapisywać do tab.5.

5.5.3. Sporządzić wykres P_{Fe}/f w funkcji częstotliwości f (rys.7), odczytać wartości współczynników k_1 i k_2 (zgodnie z pkt. 2.7.1). Przedstawić na wspólnym wykresie zależność strat magnetycznych w żelazie P_{Fe} (8), strat histerezowych P_h (21a) i wiropądowych P_w (21b) od częstotliwości f . Wyznaczyć straty histerezowe P_h i straty wiropądowe P_w dla częstotliwości $f = 50$ Hz.

Tab.5. Rozdział strat metodą częstotliwościową

lp	Nastawy			Ustawienia watomierza				Odczyty			Obliczenia					
	f	B_{max}	$U_{2sr(1-1)}$	I_{zn}	U_{zn}	$\cos\phi_{zn}$	k_w	α_w	P_m	I_{1sk}	P_{Fe}	P_{Fe}/f	k_1	k_2	P_h	P_w
	Hz	T	V	A	V	-	W/dz	dz	W	A	W	W/Hz	W/Hz	W/Hz ²	w	w

5.5.4. Wyłączyć stanowisko zgodnie z „Instrukcją uruchamiania i eksploatacji stanowiska pomiarowego aparatu Epsteina”, pkt.3.

5.6. Opracowanie wyników pomiarów i przygotowanie sprawozdania

W sprawozdaniu należy przedstawić opis stanowiska pomiarowego oraz w punktach kolejno zrealizowane zadania pomiarowe podając: temat zadania pomiarowego, schemat układu pomiarowego, wykaz przyrządów, tabelkę z wynikami pomiarów i obliczeń, niezbędne wzory obliczeniowe, przykładowe obliczenia, wykresy przewidziane programem ćwiczenia.

We wnioskach należy przedstawić własne uwagi na temat zrealizowanych pomiarów, napotkane trudności, ocenę uzyskanych wyników. W szczególności należy zastanowić się nad następującymi zagadnieniami:

- czy otrzymano charakterystykę transformatora powietrznego zgodną z oczekiwaniami i czy udało się ją odpowiednio zaproksymować ?
- czy otrzymano dynamiczną krzywą magnesowania zgodną z oczekiwaniami (kształt, wartości natężenia pola i indukcji magnetycznej) ?
- czy zmierzona stratność próbki jest zgodna z oczekiwaniami ?
- czy uzasadnione było pominięcie korekty według wzoru (6) ?
- czy straty magnetyczne okazały się zależne od kwadratu indukcji ?
- czy współczynnik kształtu spełnia wymagania normy ?
- czy wykres do przeprowadzenia rozdziału strat ma kształt zgodny z oczekiwaniami ?
- czy wyznaczone parametry badanej próbki są zgodne z oczekiwaniami ?

6. Pytania kontrolne

1. Co to straty magnetyczne i od czego zależą ?
2. Jak wyznaczamy stratność magnetyczną ?
3. Jak ustala się maksymalną wartość indukcji magnetycznej w próbce ?
4. Jak ustala się maksymalną wartość natężenia pola magnetycznego w próbce ?
5. W jakim celu i jak przeprowadza się skalowanie transformatora powietrznego ?
6. Jak oblicza się przekrój próbki ?
7. Opisz budowę aparatu Epsteina.
8. Co to jest masa efektywna próbki ?
9. Jak przygotowuje się próbkę do badań w aparacie Epsteina ?
10. Co to jest dynamiczna krzywa magnesowania i jak się ją wyznacza ?
11. Jakie wymagania powinien spełniać watomierz do aparatu Epsteina ?
12. Jak przeprowadza się rozdział strat magnetycznych ?
13. Ile wynosi i jak się wyznacza umowną efektywną długość drogi strumienia magnetycznego w aparacie Epsteina 25 cm ?

7. Literatura

1. PN-EN 60404-2, Materiały magnetyczne – część 2: Metody pomiaru własności magnetycznych stalowych blach i taśm elektrotechnicznych przy użyciu aparatu Epsteina.

2. PN-EN 10106, Blachy i taśmy stalowe elektrotechniczne o ziarnie nieorientowanym walcowane na zimno, dostarczane w stanie w pełni przetworzonym.
3. PN-EN 10107, Blachy i taśmy stalowe elektrotechniczne o ziarnie zorientowanym walcowane na zimno, dostarczane w stanie w pełni przetworzonym.
4. Nałęcz M., Jaworski J., Miernictwo magnetyczne, WNT, Warszawa 1968.
5. Marcyniuk A. i inni, Podstawy metrologii elektrycznej, WNT, Warszawa 1984.
6. Chwaleba A. i inni, Metrologia elektryczna, WNT, Warszawa 2009.
7. Stalprodukt S.A., Blachy i taśmy elektrotechniczne, <http://www.stalprodukt.com.pl>