

BADANIE MATERIAŁÓW MAGNETYCZNYCH

1. Cel ćwiczenia

Poznanie zagadnień związanych z badaniem właściwości materiałów ferromagnetycznych w polach zmiennych na przykładzie badania próbki toroidalnej blachy elektrotechnicznej metodą oscylograficzną, a także na przykładzie wyznaczenia podstawowej krzywej magnesowania i stratności próbki blachy elektrotechnicznej w aparacie Epsteina.

2. Wiadomości ogólne

Podstawowymi charakterystykami materiałów ferromagnetycznych są zależności typu $B(H)$, przy czym B jest indukcją¹ odpowiadającą natężeniu pola H w badanym materiale. Do charakterystyk najczęściej używanych w praktyce projektowania należą:

- a) komutacyjna krzywa magnesowania - jest miejscem geometrycznym wierzchołków krzywych, otrzymywanych przy cyklicznym przemagnesowywaniu, odpowiadających różnym wartościom natężenia pola H ;
- b) pętla histerezy - jest zależnością $B = f(H)$ otrzymywaną przy cyklicznych zmianach natężenia pola w granicach $\pm H_m$ charakteryzuje materiał zwłaszcza wtedy, gdy zmiany natężenia pola odpowiadają stanowi nasycenia;
- c) krzywa odmagnesowania - jest częścią pętli histerezy zawartą w granicach $-H_c + B_r$; charakteryzuje magnesy trwałe.

Charakterystyki wyznaczone w polu stałym noszą nazwę statycznych, zaś wyznaczone w polu zmiennym - dynamicznych. Pomiary przeprowadza się na próbkach zamkniętych (toroidalne, ramowe, jarzmowe) lub otwartych (kształty nieujednolicone).

W ćwiczeniu poznamy metodę oscylograficzną w zastosowaniu do badania próbki toroidalnej. Natomiast spośród metod badania stratności blach elektrotechnicznych najszersze zastosowanie znalazła metoda watomierzowa z próbką ramową umocowaną w aparacie Epsteina. Jest to metoda ściśle i szczegółowo poddana opisowi normalizującemu [1,2]. W ćwiczeniu poznamy ją w nieco uproszczonej postaci.

Należy zaznaczyć, że wszystkie charakterystyki materiałów magnetycznych, wyznaczone w zadanych warunkach wybranymi metodami, są w dużej mierze charakterystykami umownymi. Szczególnie odnosi się to do charakterystyk wyznaczanych w polach zmiennych. W tym przypadku właściwości magnetyczne są ściśle związane np. ze zjawiskiem prądów wirowych. Natomiast zjawisko powstawania prądów wirowych silnie zależy od przewodności właściwej materiału, częstotliwości przemagnesowywania oraz kształtu i wymiarów próbki. Dlatego, przy zachowaniu jednakowych warunków magnesowania, dla rozmaitych próbek wykonanych z tego samego materiału właściwości magnetyczne mogą być różne i dlatego tylko umownie mogą być nazwane charakterystykami materiału. W rzeczywistości są charakterystykami próbek o zdefiniowanych kształtach i wymiarach.

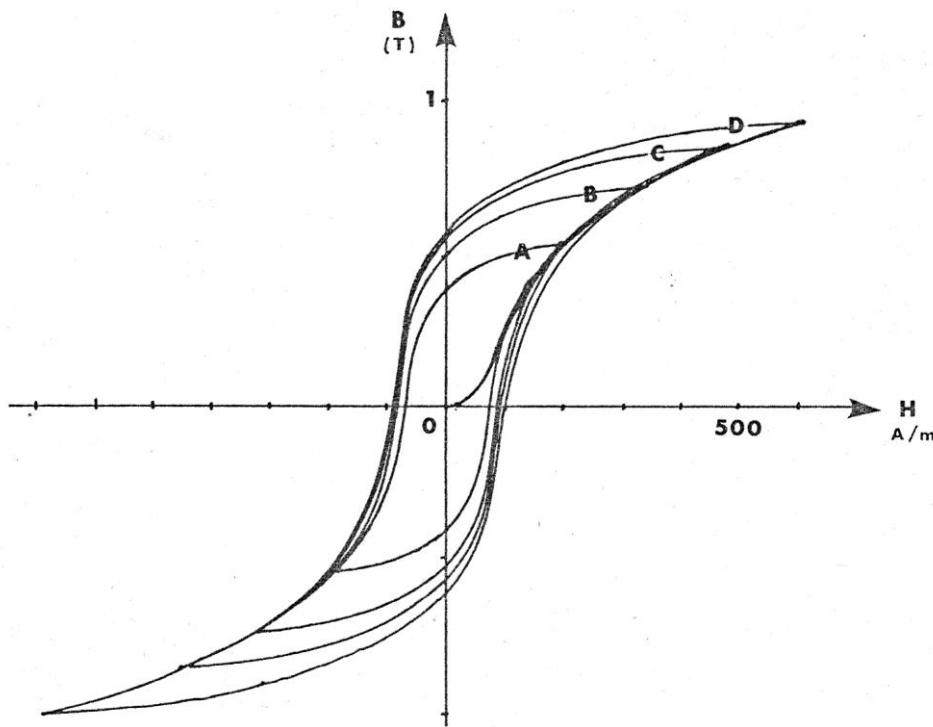
Przy magnesowaniu materiału polem zmiennym zmiany stanu magnetycznego zachodzą zgodnie z dynamiczną pętlą histerezy, przy czym część energii pola, określona powierzchnią pętli, przekształca się w ciepło. Moc odpowiadającą przekształconej w ciepło energii pola nazywamy stratami w żelazie. Moc strat jest ważnym parametrem charakteryzującym materiały magnetyczne w polach zmiennych. Do obliczeń często używa się pojęcia stratności, czyli tzw. strat właściwych określanych w watach na kg lub w watach na m³. Obszar dynamicznej pętli histerezy zależy nie tylko od histerezy statycznej (straty na histerezę), ale i od prądów wirowych (straty na prądy wirowe). Straty na prądy wirowe bardzo silnie zależą między innymi od kształtu próbki i grubości blach. Bierze stąd źródło wspomniana umowność charakterystyk.

Analogicznie do pojęcia dynamicznej pętli histerezy stosowane jest pojęcie dynamicznej podstawowej krzywej magnesowania, przy czym rozróżnia się najczęściej kilka jej postaci:

¹ W publikacjach z obszaru teorii i praktyki pomiarów właściwości magnetycznych materiałów funkcjonują równolegle dwa określenia parametru opisującego pole magnetyczne w materiale magnetycznym, a mianowicie „indukcja magnetyczna” i „polaryzacja magnetyczna”. Określenia te, w obwodach magnetycznych bez szczeliny lub ze szczeliną o długości pomijalnie małej, dotyczą parametrów niemal tożsamy. Dla uproszczenia dalszych opisów charakterystyk materiałów badanych w postaci próbek: pierścieniowej i ramowej Epsteina, posługujemy się w niniejszej instrukcji określeniem „indukcja magnetyczna”, mimo iż w nowych edycjach norm IEC używany jest termin „polaryzacja magnetyczna”.

- 1) zależność amplitudy indukcji od amplitudy natężenia pola $B_m = f(H_m)$,
- 2) zależność amplitudy indukcji od wartości skutecznej natężenia pola $B_m = f(H_{sk})$,
- 3) zależność amplitudy podstawowej harmoniczej indukcji od amplitudy podstawowej harmoniczej natężenia pola $B_{1m} = f(H_{1m})$.

Wybór jednej z wymienionych charakterystyk zależy od dostępności odpowiedniej metody pomiaru, lub też uwarunkowany jest potrzebami wynikającymi z procesu projektowania urządzeń, dla których badany materiał jest przeznaczony.



Rys.1. Przykładowe cykle magnesowania blachy elektrotechnicznej

Właściwości magnetyczne blach elektrotechnicznych są przedmiotem szczególnego zainteresowania producentów tych blach oraz ich odbiorców: producentów transformatorów, silników i wielu innych urządzeń z obszaru elektrotechniki. W konsekwencji metody pomiarowe wymagane w badaniach blach elektrotechnicznych zostały zdefiniowane w normach Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (International Electrotechnical Commission - IEC). Od wielu lat najczęściej stosowaną tu metodą badania jest tzw. metoda watomierzowa, wykorzystująca obwód magnetyczny formowany z pasków badanej blachy, złożonych w kształt ramy zwanej aparatem Epsteina. Metoda watomierzowa jak i aparat Epsteina są szczegółowo opisane w normach [1,2].

3. Metoda oscylograficzna - zasada pomiaru

Natężenie pola H_m wyznacza się metodą pośrednią przez pomiar prądu I w uzwojeniu pierwotnym (magnesującym) próbki, przy czym: z_m - oznacza liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego, l - średnią długość drogi strumienia magnetycznego w próbce:

$$H_m = \frac{z_m}{l} I \quad (1)$$

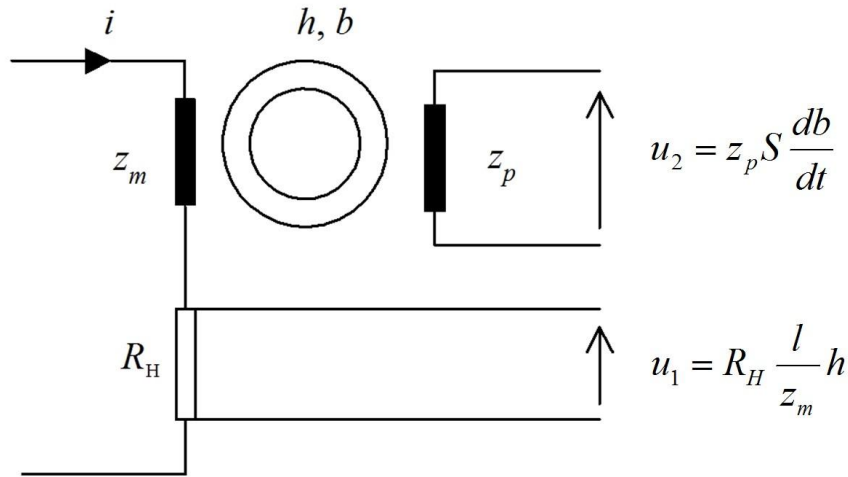
Metoda oscylograficzna należy do najprostszych metod wyznaczania dynamicznej pętli histerezy materiałów ferromagnetycznych. Obraz pętli jest wykreślany w postaci ciągłej krzywej bezpośrednio na ekranie oscyloskopu. Aby można było obraz taki otrzymać, trzeba do płytek odchylenia poziomego lampy oscyloskopowej dostarczyć napięcie $u(t)$ proporcjonalne do chwilowych wartości natężenia pola $h(t)$, natomiast do płytek odchylenia pionowego - napięcie $u_b(t)$ proporcjonalne do chwilowych wartości indukcji $b(t)$ w badanej próbce.

Rozważamy układ do pomiaru charakterystyk magnesowania materiału magnetycznie miękkiego w polu magnetycznym przemiennym. Badany materiał występuje w postaci rdzenia toroidalnego o średniej długości linii pola magnetycznego l i powierzchni przekroju poprzecznego S ; rdzeń ma dwa uzwojenia: magnesujące o z_m zwojach i pomiarowe o z_p zwojach (rys.2, rys.3). Pole magnetyczne w rdzeniu jest opisane natężeniem pola

magnetycznego h i indukcją magnetyczną b , wielkościami okresowo zmiennymi antysymetrycznymi, spełniającymi warunki

$$h(t) = -h(t + \frac{T}{2}) \quad \text{ i } \quad b(t) = -b(t + \frac{T}{2}) \quad (2)$$

gdzie: $h(t)$ i $b(t)$ – czasowe rozkłady natężenia pola i indukcji w rdzeniu,
 T – okres zmienności natężenia pola i indukcji.



Rys. 2. Pomiar charakterystyki magnesowania, model próbki toroidalnej.

Przyjmujemy, że reprezentacją charakterystyki magnesowania jest ciąg par utworzonych przez:

- wartość szczytową natężenia pola

$$H_m = \max_{\tau \in [t, t+T]} \{h(\tau)\} \quad (3)$$

- wartość szczytową indukcji

$$B_m = \max_{\tau \in [t, t+T]} \{b(\tau)\} \quad (4)$$

gdzie: $\max_{\tau \in [a, b]} \{f(\tau)\}$ – operator wyznaczania maksimum funkcji $f(\tau)$ w przedziale $\tau \in [a, b]$.

Stratność objętościowa wyrazi się wzorem:

$$p_V = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} h(\tau) \dot{b}(\tau) d\tau \quad (5)$$

gdzie \dot{b} jest pochodną indukcji b względem czasu. Indukcja b jest niczym innym jak gęstością strumienia magnetycznego Φ , czyli

$$b = \frac{1}{S} \int_S \mathbf{b} \cdot d\mathbf{S} \quad (6)$$

gdzie: \mathbf{b} – wektor indukcji magnetycznej w punkcie na powierzchni przekroju S ,

$d\mathbf{S}$ – element powierzchni S ,

\cdot (kropka) – symbol iloczynu skalarnego.

Wielkości h i b nie są bezpośrednio dostępne, zamiast nich są dostępne sygnały mierzone: spadek napięcia u_1 na oporniku R_H w obwodzie magnesującym i napięcie u_2 indukowane w uzwojeniu pomiarowym

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= R_H i = R_H \frac{l}{z_m} h \\ u_2 &= z_p S \frac{db}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Korzystając z zależności (5) i (7) stratność objętościową można wyrazić wzorem:

$$p_V = \frac{1}{Sl} \frac{z_m}{z_p} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(t) u_2(t) dt = \frac{1}{R_H Sl} \frac{z_m}{z_p} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_1(t) u_2(t) dt \quad (8)$$

Proces pomiaru przy badaniu krzywej magnesowania sprowadza się do wyznaczenia współrzędnych geometrycznych wybranych punktów obrazu pętli. Znając odpowiednie współczynniki proporcjonalności, określone parametrami układu, można przejść do współrzędnych indukcji i natężenia pola. Badanie stratności wymaga dodatkowo wykonania operacji opisanej równaniem (8). Częściej niż stratnością objętościową p_v (moc czynna tracona na przemagnesowanie jednostki objętości ferromagnetyka) posługujemy się stratnością wagową p_m (moc czynna tracona na przemagnesowanie jednostki masy ferromagnetyka). Przeliczenie jest proste

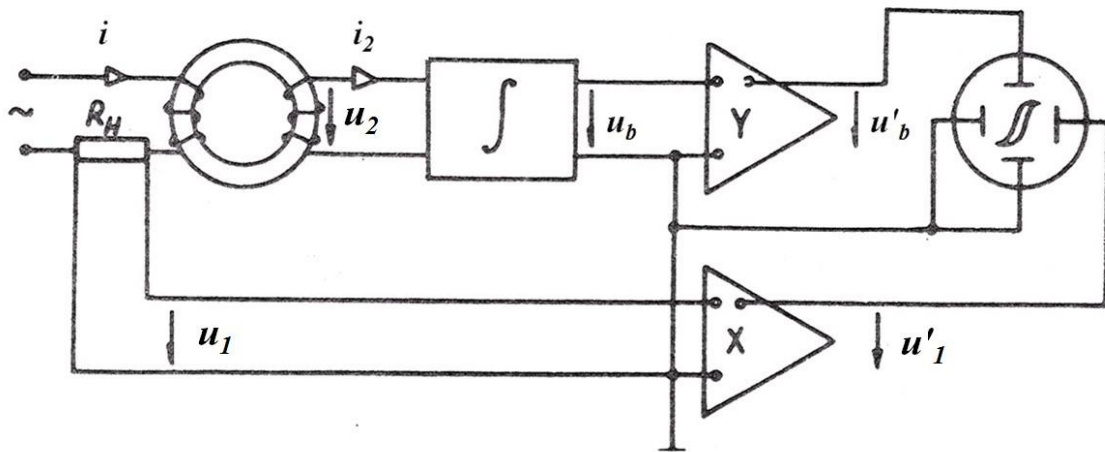
$$p_m = \frac{1}{\rho} p_v \quad (9)$$

przy czym ρ jest gęstością (masą właściwą) ferromagnetyka.

Chwilową wartość natężenia pola $h(t)$ można wyznaczyć z chwilowej wartości prądu magnesującego $i(t)$, ponieważ prąd $i_2(t)$ pobierany przez obwód uzwojenia wtórnego może być pominięty jako bardzo mały w porównaniu z magnesującym. Spadek napięcia na niewielkim bezindukcyjnym oporniku o rezystancji R_H , włączonym w szereg z uzwojeniem magnesującym próbki, będzie zatem proporcjonalny do natężenia pola $h(t)$

$$u_1(t) = R_H i(t) = \frac{R_H l}{z_m} h(t) = k_h h(t) \quad (10)$$

gdzie $k_h = R_H l / z_m$ - jest współczynnikiem proporcjonalności. Zakłada się przy tym, że rezystancja wejściowa wzmacniacza X oscyloskopu jest dużo większa od rezystancji R_H .



Rys. 3. Układ pomiarowy metody oscylograficznej

W uzwojeniu wtórnym próbki indukuje się napięcie $u_2(t)$, które jest podane na wejście układu całkującego. Na wyjściu tego układu otrzymuje się

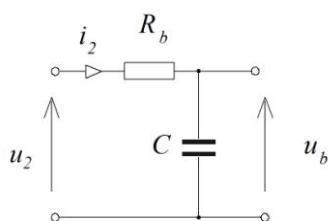
$$u_b(t) = \frac{1}{\tau} \int u_2(t) dt = \frac{z_p S}{\tau} b(t) = k_b b(t) \quad (11)$$

gdzie τ - jest stałą czasową układu całkującego zaś $k_b = z_p S / \tau$ - jest współczynnikiem proporcjonalności. Przykład prostego układu całkującego podano na rys. 4. Jeśli w tym układzie przyjąć, że $1/\omega C \ll R_b$, to będzie spełniona w przybliżeniu zależność:

$$i_2(t) \cong \frac{1}{R_b} u_2(t) \quad (12)$$

oraz

$$u_b(t) = \frac{1}{C} \int i_2(t) dt = \frac{1}{R_b C} \int u_2(t) dt = k_b b(t) \quad (13)$$



Rys. 4. Układ całkujący RC

przy czym stała czasowa rozpatrywanego układu $\tau = R_b C$. Układ całkujący powinien mieć także bardzo dużą impedancję wejściową $Z_{wej} \cong R_b$, aby nie obciążać uzwojenia wtórnego próbki. Wynika to z założeń upraszczających przy tworzeniu równania (10).

Mając napięcia $u_1(t)$ i $u_b(t)$ można otrzymać szukany obraz pętli histerezy podając je przez wzmacniacze X i Y na płytki odchylenia poziomego i pionowego oscyloskopu. Aby wyskalować obraz pętli w jednostkach indukcji i natężenia pola, należy określić odpowiednie

współczynniki proporcjonalności:

$$K_H = \frac{1}{k_h S_x} \quad \frac{\text{A/m}}{\text{cm}} \quad (14)$$

$$K_B = \frac{1}{k_b S_y} \quad \frac{\text{T}}{\text{cm}} \quad (15)$$

przy czym $S_x = a_x/U_x$ [cm/V] - jest czułością wejścia "X" oscyloskopu, $S_y = a_y/U_y$ [cm/V] - jest czułością wyjścia "Y" oscyloskopu. Stąd:

$$\left. \begin{aligned} h(t) &= K_H a_H \\ b(t) &= K_B a_B \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

gdzie a_H i a_B - współrzędne pozioma i pionowa wyznaczonego punktu obrazu w cm.

Źródła błędów pomiarów oscylograficznych

Podstawowymi źródłami błędów są: niewłaściwe przygotowanie próbki, niedokładność wyznaczenia wymiarów geometrycznych próbki, pola rozproszenia, niedokładny odczyt z ekranu itp. Może liczyć się także błąd układu całkującego. Inne czynniki wpływające na dokładność wyznaczania np. krzywej magnesowania to:

- błędy wprowadzone przez metody przetwarzania natężenia pola H i indukcji B ,
- niedokładność użytych przyrządów i elementów oraz błędy odczytu,

W wymienionych grupach błędów mieści się szereg innych, z których najważniejsze to błędy powodowane:

- a) niejednorodnością rozkładu pola w próbce,
- b) istnieniem pola rozproszenia,
- c) niedokładnością określenia wymiarów geometrycznych próbek,

Niedokładność całkowania układu całkującego (rys.4) zależy od stosunku rezystancji R_b do reaktancji $1/\omega C$, tj. od wartości $\omega R_b C = \omega \tau$. Zazwyczaj przyjmuje się $\omega \tau = 100 \div 600$. Przyjęcie mniejszej wartości τ (przy $\omega = \text{const}$) prowadzi do zwiększenia błędu całkowania, natomiast przyjęcie większej wartości τ prowadzi do zbytecznego zmniejszania napięcia na wyjściu układu i zwiększa tym samym podatność układu na wpływ napięć pasożytniczych. Ponadto wartość rezystancji R_b nie może być zbyt mała, gdyż nadmierne obciążenie wtórnego uzwojenia próbki objawia się poszerzeniem obrazu pętli histerezy i jest źródłem błędu przy określaniu natężenia koercji oraz kształtu i powierzchni pętli.

Przyczyną zniekształcenia obrazu pętli mogą być także przesunięcia fazowe wprowadzane przez wzmacniacz "X" i "Y" oscyloskopu (następuje zmiana fazy napięcia na wyjściu wzmacniacza, przy czym zmiana ta jest różna dla różnych częstotliwości, co powoduje z kolei zmianę kształtu krzywej napięcia przy zawartości w niej wyższych harmonicznych).

Wyniki pomiarów przyjmuje się na ogół jako zadowalające, jeśli błędy pomiaru powodowane zniekształceniami fazowymi i amplitudowymi wzmacniaczy oscyloskopu nie przekraczają $\pm 3\%$.

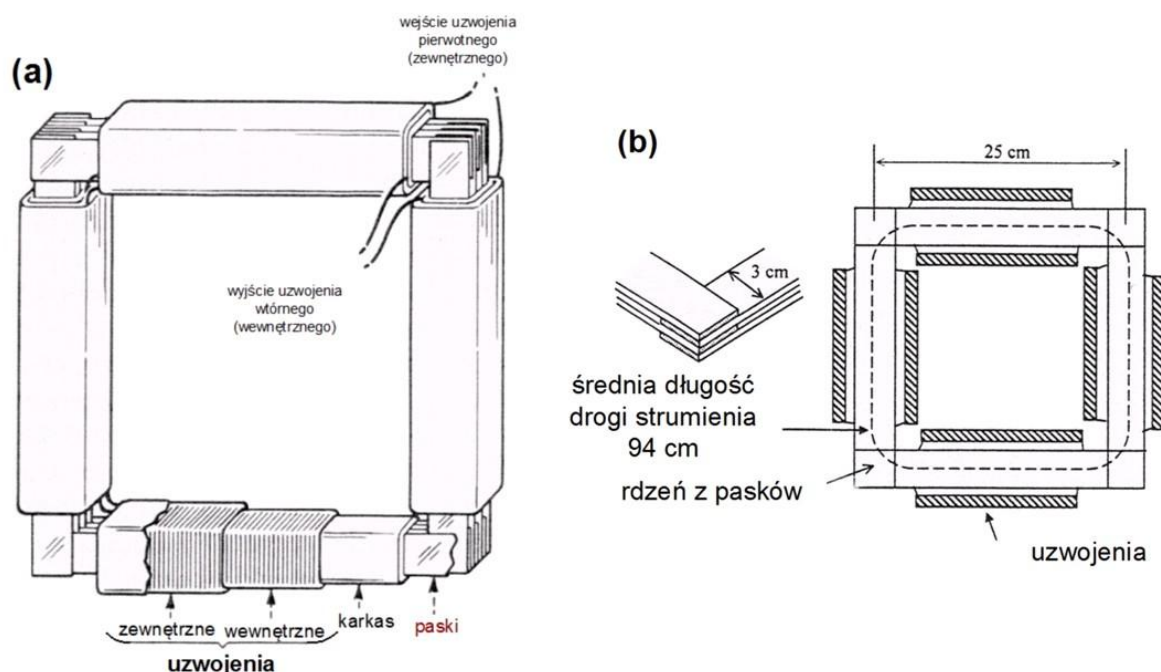
4. Budowa aparatu Epsteina

Na rys. 5 naszkicowano w sposób uproszczony budowę aparatu Epsteina. Aparat przedstawia sobą kwadratową ramę utworzoną z czterech karkasów, na których nawinięte są przewodem miedzianym zwoje pierwotne (magnesujące) i wtórne (pomiarowe). Zwoje pierwotne połączone są szeregowo - to samo dotyczy zwojów wtórnych. Średnia długość każdego boku wynosi 25 cm. Cewki aparatu powinny być ustawione w czworobok na wspólnej płycie izolacyjnej, zaopatrzonej na rogach w zaciski umożliwiające dociskanie włożonych pasków.

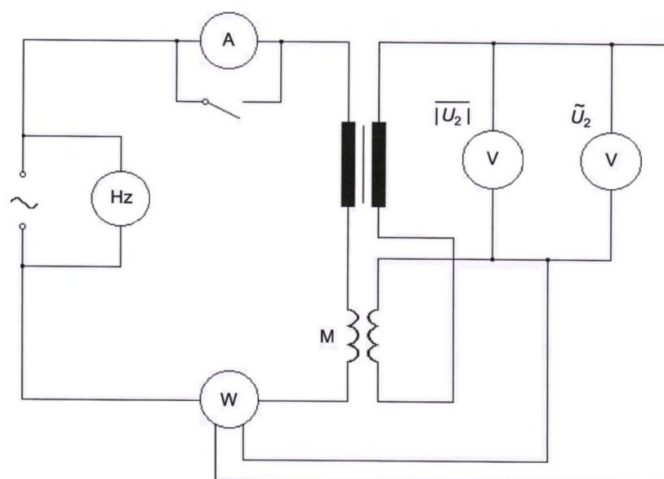
Badana blacha jest starannie cięta na $12 \div 24$ pasków - połowa wzdłuż kierunku walcowania, połowa w poprzek. W karkasach umieszcza się cztery próbki, składane z pasków o długości najmniej 28 cm i szerokości 3 cm, zestawione w zamknięty obwód magnetyczny. Paski składane są na zakładkę w połączeniach narożnikowych. W przeciwnych ramionach ramy znajdują się próbki o tym samym kierunku walcowania. Dla takiej ramy, wykonanej zgodnie z zamieszczonymi w normie [1, 2] wymiarami (wraz z tolerancjami wykonania) przyjęto umownie, że średnia droga strumienia magnetycznego w obwodzie zamkniętym wynosi 94 cm. Ta umowna wartość daje podstawę dla uznawania, że moc strat zmierzona aparatem Epsteina jest właściwa tylko dla blach badanych takim aparatem.

Uzwojenie pierwotne i wtórne każdej z czterech cewek ma zazwyczaj po 175 zwojów równomiernie nawiniętych. Łącznie zatem w aparacie Epsteina jest 700 zwojów pierwotnych i 700 zwojów wtórnych. Według norm [1, 2] rezystancje i indukcyjności uzwojeń nie powinny przekraczać zadanych wartości. Nieprzestrzeganie tych wartości może prowadzić do znacznych błędów przy pomiarach (dlaczego?).

Aparat Epsteina można rozpatrywać jak transformator o zwojach pierwotnych z_1 i wtórnych z_2 , przy czym rdzeń transformatora stanowi badana próbka. Na rys.6 przedstawiony jest schemat układu pomiarowego współpracującego z aparatem. W obwód cewek magnesujących (pierwotnych) włączone są amperomierz i tor prądowy watomierza. Do cewek napięciowych wtórnych dołączone są dwa woltomierze: V_2 - wartości skutecznej i V_3 - wartości średniej oraz tor napięciowy watomierza. Przy takim włączeniu wskazanie watomierza jest proporcjonalne do mocy czynnej strat w próbce badanego materiału, wskazanie woltomierza wartości średniej jest proporcjonalne do indukcji w próbce, zaś amperomierza proporcjonalne do natężenia pola w próbce. Pomiar odbywa się przy ściśle określonej częstotliwości (częstościomierz) i przy ściśle określonym współczynniku kształtu krzywej napięcia (wskazania woltomierzy V_2 , i V_3 - wartości skutecznej i wartości średniej). Widoczna na schemacie cewka indukcyjności wzajemnej służy do kompensacji strumienia rozproszenia w powietrzu i powinna być umieszczona w centrum przestrzeni zamkniętej przez cztery cewki, a jej oś obrotu skierowana prostopadle do płaszczyzny osi tych cewek. Odpowiedni dobór wartości indukcyjności wzajemnej pozwala na minimalizację błędu pomiaru indukcji B_m [patrz wzory (21)÷(23)], powodowanego zjawiskiem sprzężenia między uzwojeniem magnesującym i pomiarowym poprzez powietrze, a nie wyłącznie poprzez próbkę materiału ferromagnetycznego.



Rys.5. Schemat budowy aparatu Epsteina 25 cm; (a) widok ogólny, (b) szkic obwodu magnetycznego



Rys.6. Układ pomiarowy do aparatu Epsteina wg. [2]: W - watomierz, $V \left\{ \overline{|U_2|} \right\}$, $V \left\{ \tilde{U}_2 \right\}$ - woltomierze wartości średniej i wartości skutecznej, A - amperomierz, Hz - częstościomierz, M - cewka indukcyjności wzajemnej do kompensacji strumienia rozproszenia w powietrzu.

Wyznaczanie natężenia pola

Amplitudę pola magnetycznego w próbce określa się wzorem

$$H_m = \frac{I_m z_m}{l} \quad (17)$$

w którym: I_m - wartość amplitudy prądu magnesującego, z_m - liczba zwojów magnesujących, l - średnia długość drogi strumienia w próbce.

W celu wyznaczenia wartości H_m na podstawie wzoru (17) należałoby zastosować amperomierz pozwalający na bezpośredni pomiar wartości szczytowej prądu. Budowa takiego amperomierza nastręcza jednak pewne trudności i często amplituda natężenia pola wyznaczana jest pośrednio, poprzez pomiar wartości skutecznej prądu pierwotnego. Wobec tego wzór (17) przyjmie postać

$$H_m = \sqrt{2} \frac{I z_m}{l} \quad (18)$$

Należy podkreślić, że wzór (18) pozwala na wyznaczenie H_m jedynie przy spełnieniu jednego z alternatywnych warunków:

- 1) układ pomiarowy zasilany jest ze źródła o wymuszeniu napięciowym sinusoidalnym i próbka nie znajduje się w stanie nasycenia,
- 2) układ pomiarowy zasilany jest ze źródła o wymuszeniu prądowym sinusoidalnym - warunek ten nie wymaga określania stanu magnetycznego próbki.

Jakkolwiek spełnienie warunku drugiego z punktu widzenia wygody pomiaru wydaje się być bardziej atrakcyjne, to jednak względ na prostszą realizację praktyczną powoduje, że dużo częściej spełniane jest wymaganie sinusoidalnego wymuszenia napięciowego. Przy wymuszeniu napięciowym - gdy próbka znajduje się w stanie nasycenia - należy liczyć się ze znacznym błędem określenia wartości H_m na podstawie wzoru (18) (dlaczego?).

Wyznaczanie indukcji

Wartość maksymalną indukcji magnetycznej w próbce B_m wyznacza się na podstawie wskazań woltomierza włączonego po stronie wtórnej aparatu. Wskutek przepływu zmiennego strumienia Φ w próbce w uzwojeniu wtórnym z_p indukuje się napięcie:

$$u_2 = -z_p \frac{d\Phi}{dt} = -z_p S \frac{db}{dt} \quad (19)$$

przy czym S - jest przekrojem drogi strumienia w próbce. Wartość średnia u_2 wynosi

$$\begin{aligned} U_{2sr} &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u_2 dt = 2 f z_p S \int_0^{T/2} \frac{db}{dt} dt = \\ &= 2 f z_p S \int_{-B_m}^{+B_m} db = 4 f z_p S B_m \end{aligned} \quad (20)$$

Przekształcając wzór (20) otrzymuje się

$$B_m = \frac{U_{2sr}}{4 f z_p S} \quad (21)$$

Gdy wartość U_{2sr} jest wyznaczana ze wskazań woltomierza reagującego na wartość średnią, ale wyskalowanego w wartości skutecznej dla przebiegu sinusoidalnego (co zazwyczaj ma miejsce), to:

$$B_m = \frac{U_2}{4,44 f z_p S} \quad (22)$$

gdzie U_2 - jest wskazaniem woltomierza ($U_2 = 1,111 U_{2sr}$). Natomiast gdy korzystamy z woltomierza reagującego na wartość skuteczną i w tej wartości wyskalowanego - co jest regułą - to wzór (22) przyjmie postać

$$B_m = \frac{U_{2sk}}{4 f k_k z_p S} \quad (23)$$

w której: k_k jest współczynnikiem kształtu ($k_k = U_{2sk}/U_{2sr}$).

Przy zasilaniu obwodu pierwotnego ze źródła o wymuszeniu napięciowym sinusoidalnym oraz przy założeniu, że reaktancja cewek magnesujących założonych na próbkę jest dużo większa od impedancji pozostałych

elementów obwodu pierwotnego, można przyjąć, że u_2 będzie przebiegiem sinusoidalnym także i przy nasyceniu próbki (dlaczego?). W tym przypadku wskazania dwu wspomnianych wyżej woltomierzy będą jednakowe i wartość B_m będzie można wyznaczyć według wzorów (22) lub (23).

Przy zasilaniu obwodu magnesującego ze źródła o wymuszeniu prądowym sinusoidalnym i próbce nasyczonej, u_2 będzie miał przebieg odkształcony. Wartość B_m można wyznaczyć tu jedynie za pomocą woltomierza reagującego na wartość średnią. To samo dotyczy zasilania o wymuszeniu napięciowym odkształconym. Na wszelki wypadek kształt przebiegu wtórnego napięcia powinien być zawsze sprawdzany oscyloskopem dla upewnienia się, że występuje tylko harmoniczna podstawowa.

Wyznaczanie strat w żelazie

Operację matematyczną opisaną wzorem (8) w układzie pomiarowym współpracującym z aparatem Epsteina realizuje w wersji klasycznej metody watomierz połączony jak na rys.6. Stratność odnoszoną do jednostki masy określa się wzorem

$$p_m = \frac{P_w}{m} \frac{z_m}{z_p} \quad (24)$$

w którym P_w - jest wskazaniem watomierza, zaś m - masą próbki.

Należy zaznaczyć, że przy przypisaniu wskazaniom watomierza strat w żelazie przyjęto zasilanie układu ze źródła o wymuszeniu napięciowym oraz pominięto rezystancję uzwojenia wtórnego, jako bardzo małą w porównaniu do równolegle połączonych rezystancji woltomierzy i toru napięciowego watomierza. Zastosowanie źródła o wymuszeniu napięciowym sinusoidalnym jest motywowane także wymaganiem jednoznaczności i powtarzalności wyników pomiaru - wskazanie watomierza jest proporcjonalne do sumy iloczynów jednakowych harmoniczných napięcia i prądu, zgodnie z wzorem:

$$P_w = \sum_{i=1}^n U_i I_i \cos \varphi_i \quad (25)$$

Niejednoznaczności wskazań można uniknąć, przyjmując wprawdzie jeden z dwu granicznych przypadków magnesowania:

- 1) przy sinusoidalnej indukcji - źródło o wymuszeniu napięciowym,
- 2) przy sinusoidalnym natężeniu pola - źródło o wymuszeniu prądowym,

ale przytaczane wyżej inne przesłanki (jakie?), spowodowały, że w normach [1,2], przyjęto wyłącznie przypadek sinusoidalnej indukcji.

Analizując warunki pracy watomierza przy pomiarze strat należy zauważyć, że kąt przesunięcia między napięciem po stronie wtórnej a prądem magnesującym po stronie pierwotnej przybiera wartości bliskie 90° w miarę jak straty maleją. Powoduje to, że watomierz pracuje przy bardzo małym kosinusie kąta. Gdy znamionowy kosinus watomierza jest równy jedności - co ma zazwyczaj miejsce - to wskazania przy pomiarze będą niewielkie (początek zakresu - także przy prądzie i napięciu zbliżonych do wartości znamionowych). Z tego względu do aparatu Epsteina stosuje się watomierze specjalnie wykonane - o znamionowym kosinusie rzędu 0,1 - 0,4.

Przygotowanie próbki

Paski należy wycinać z arkusza blachy gładkiej, bez łusek, pęcherzy, pęknięć, naderwań i zawałowań oraz bez skupisk zgorzeliny, rdzy i zanieczyszczeń po trawieniu. Ze względu na zmianę właściwości magnetycznych blach pod wpływem zgniotu, paski powinny być wycinane za pomocą nożyc gilotynowych o pionowym ruchu noża. Nie wolno blachy po ucięciu poddawać jakiegokolwiek obróbce mechanicznej, jak np. szlifowanie. Połowa pasków powinna być wycięta wzdłuż, a połowa w poprzek kierunku walcowania blachy. Dotyczy to blach izotropowych, gdyż blachy anizotropowe (zimnowalcowane) bada się wzdłuż kierunku walcowania.

Badana próbka powinna być zważona, a jej masa określona z niepewnością $\pm 0,1\%$. Po zważeniu paski powinny być włożone do cewek pomiarowych aparatu Epsteina z podwójnie założonymi narożami, z tą samą liczbą pasków w każdym z ramion jarzma tak, że wewnętrzna długość boku utworzonego kwadratu wynosi 220 mm. Jeżeli paski są cięte w połowie równolegle i w połowie prostopadle do kierunku walcowania, to paski wycięte w kierunku walcowania powinny być umieszczone w dwóch przeciwległych ramionach, a wycięte prostopadle do kierunku walcowania umieszczone w innych dwóch ramionach. Należy zadbać, aby szczeliny powietrzne pomiędzy paskami w założonych narożach były możliwie najmniejsze. Dopuszczalne jest stosowanie siły około 1 N na każde naroże prostopadle do powierzchni założonych pasków.

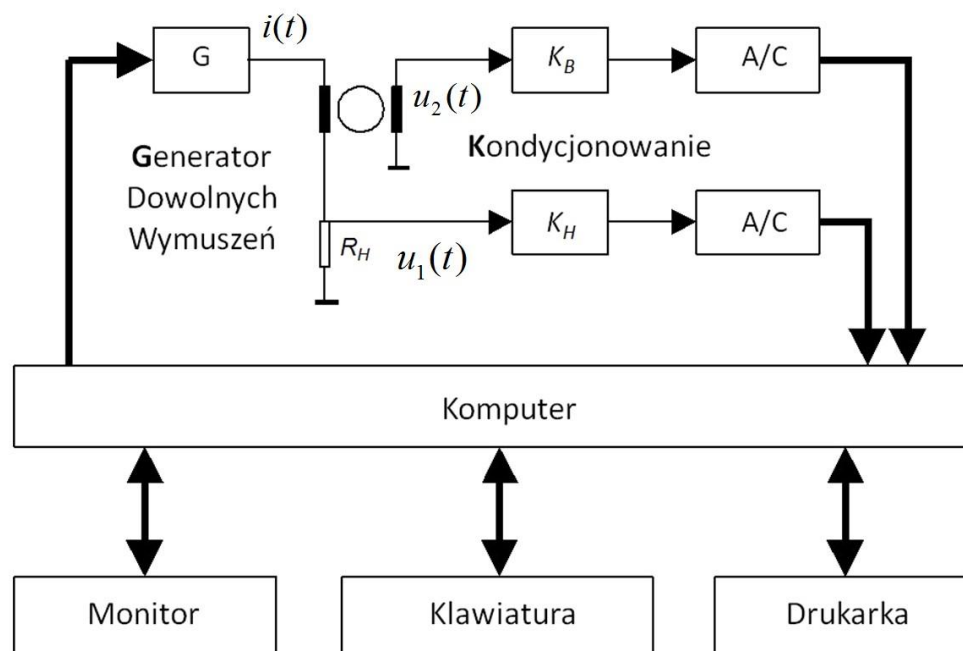
5. Komputerowe systemy do badania materiałów magnetycznych

Metoda komputerowa badania materiałów magnetycznych polega na przetworzeniu kondycjonowanych sygnałów analogowych w sygnały cyfrowe i dalszym, całkowicie numerycznym, przetwarzaniu sygnałów cyfrowych (rys. 7). Stosując odpowiednie procedury obliczeniowe – wyszukiwanie maksimum, całkowanie numeryczne, mnożenie itd. wyznacza się liczbowe wartości reprezentacji mezurandów H_{\max} , B_{\max} i p_V czy p_m . Większość systemów komputerowych ma strukturę opisaną schematem z rys. 7, różnią się natomiast procedurami przetwarzania sygnałów i oprogramowaniem.

Obiektem badań są zwykle próbki o dwóch uzwojeniach: magnesującym i pomiarowym; sygnałami wejściowymi komputerowego systemu pomiarowego są: prąd magnesujący, proporcjonalny do natężenia pola i napięcie indukowane w uzwojeniu pomiarowym, proporcjonalne do pochodnej indukcji. Z tych sygnałów wyznacza się wartości niezbędne do określenia poszukiwanych charakterystyk. Złożoność procedur pomiarowych i potrzeba wykonywania wielu obliczeń, a także poprawnej wizualizacji wyników, są głównymi przesłankami celowości zastosowania tu komputera. Komputer może spełniać różne funkcje, wśród których najważniejszymi są:

- sterowanie procedurami pomiarowymi,
- bezpośredni udział w procesach przetwarzania informacji pomiarowych,
- formowanie przebiegu czasowego pola magnesującego,
- dokumentacja wyników pomiaru,
- skalowanie i wzorcowanie systemu pomiarowego.

System komputerowy (rys. 7) przetwarza analogowe sygnały wejściowe (prądu magnesującego $i(t)$, ściślej napięcia do niego proporcjonalnego $u_1(t)$ i napięcia $u_2(t)$ z uzwojenia pomiarowego) na postać cyfrową. Informacje o właściwościach materiału magnetycznego są zawarte w przebiegach natężenia pola $h(t)$ i indukcji $b(t)$. Przebiegi $u_1(t)$, $u_2(t)$, $h(t)$, $b(t)$ są sygnałami okresowymi o okresie T . Sygnał $u_1(t)$ jest proporcjonalny do $h(t)$, ale sygnał $u_2(t)$ jest proporcjonalny do pochodnej $b(t)$ względem czasu. Otrzymanie sygnału proporcjonalnego do $b(t)$ może być zrealizowane za pomocą układu całkującego analogowego, albo z całkowaniem po stronie cyfrowej. Digitalizację i dyskretyzację sygnałów wykonują przetworniki analogowo-cyfrowe, w pierwszym przypadku sygnałami wejściowymi toru przetwarzania A/C są $u_1(t)$ i analogowo scałkowany $u_2(t)$, w drugim - $u_1(t)$ i bezpośrednio $u_2(t)$.



Rys. 7. Ogólna struktura systemu komputerowego do badania materiałów magnetycznych

Kondycjonowanie sygnałów (ang. conditioning), polega tu na takim przetworzeniu poziomu u_1 i u_2 , by - nie zmieniając ich treści – dopasować je do standardowego zakresu przetwarzania wejść karty przetworników A/C.

Dyskretyzacja sygnału polega na próbkowaniu wykonywanym zwykle w ciągu jednego okresu. Istotne jest sterowanie próbkowaniem. Próbkę należy pobierać równocześnie z obu sygnałów $u_1(t)$, $u_2(t)$, a ich rozkład w okresie powinien być równomierny. Próbkowanie polega więc, w istocie, na przejściu z sygnałów analogowych ciągłych $u_1(t)$, $u_2(t)$ na cyfrowe dyskretnie $u_1(n\Delta t)$, $u_2(n\Delta t)$ (gdzie $n\Delta t$ - czas dyskretny, $\Delta t = 1/f_N = 1/f_s$ - okres

próbkowania, f - częstotliwość sygnału próbkowanego, f_s - częstotliwość próbkowania, n - kolejny numer próbki, zmieniający się od $n = 0$ do $n = N-1$, przy czym N - liczba próbek w okresie).

Próbkowanie daje możliwość pomiaru parametrów charakterystycznych przebiegów napięcia, tj. amplitudy, okresu, częstotliwości, a także wartości średniej, skutecznej, mocy (patrz tablica 1).

Tablica 1. Definicje i obliczenia parametrów napięcia i mocy za pomocą metody próbkowania

parametr	definicja	wzór obliczeniowy
napięcie - wartość średnia	$\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$	$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{u}(n\Delta t) $
napięcie - wartość skuteczna	$\left[\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \right]^{1/2}$	$\left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{u}^2(n\Delta t) \right]^{1/2}$
moc czynna	$\frac{1}{T} \int_0^T i(t) u(t) dt$	$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{i}(n\Delta t) \hat{u}(n\Delta t)$
<p>Oznaczenia:</p> <p>$u(t), i(t), \hat{u}(t), \hat{i}(t)$ - wartości chwilowe napięcia i prądu, rzeczywiste i skwantowane,</p> <p>T - okres sygnału, N - liczba próbek, $\Delta t = \frac{T}{N} = \frac{1}{fN} = \frac{1}{f_s}$ (f_s - częstotliwość próbkowania)</p>		

Ciągi próbek $u_1(n\Delta t)$, $u_2(n\Delta t)$ są danymi wejściowymi do wyznaczania charakterystyk magnesowania. Wyznaczanie polega na utrwaleniu w pamięci komputera pętli histerezy czyli krzywej zależności między próbkami $h(n\Delta t)$ oraz $b(n\Delta t)$ o jednakowych indeksach. Otrzymanie pętli histerezy wymaga uprzedniego numerycznego scałkowania ciągu $u_2(t)$ oraz przeliczenia próbek $u_1(n\Delta t)$ i scałkowanych $u_2(n\Delta t)$ na próbki $h(n\Delta t)$ i $b(n\Delta t)$. Dla próbek toroidalnych i ramowych przeliczenie to uwzględnia wymiary geometryczne, dla próbek o innych kształtach można dodatkowo wprowadzić korekcję ze względu na pole od magnesowujące, strumień rozproszony, niejednorodność pola magnesującego, itp. Znajomość poszczególnych punktów pętli histerezy pozwala odtworzyć jej kształt ciągły, wyznaczyć charakterystyczne punkty, obliczyć straty na magnesowanie (przez obliczenie pola powierzchni pętli histerezy), obliczyć inne parametry, np. przenikalność. Wyznaczanie stosowanych dość często charakterystyk typu zależności od wartości skutecznej natężenia pola i typu zależności między podstawowymi harmonicznymi wymaga jednak osobnych procedur wykorzystujących ciągi próbek $h(n\Delta t)$, $b(n\Delta t)$. Ostatnia edycja normy IEC 60404-2:2008 zaleca w systemach komputerowych z przetwarzaniem próbkującym wyznaczanie indukcji B_m z równania

$$B_m = \frac{1}{4fz_p S} \frac{1}{T} \int_0^T |u_2(t)| dt \cong \frac{1}{4fz_p S} \sum_{n=0}^{N-1} |u_2(n\Delta t)| \quad (26)$$

zaś moc strat następująco

$$P_s = \frac{z_m}{lR_H z_p S \rho_m} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2(t) dt \cong \frac{z_m}{l_m R_H z_p S \rho_m} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_1(n\Delta t) u_2(n\Delta t) \quad (27)$$

przy czym T - jest okresem przebiegu magnesującego w [s], N - jest liczbą chwilowych wartości próbek napięcia zebranych w ciągu jednego okresu, z_m , z_p - są liczbami zwojów uzwojeń pierwotnego (magnesującego) i wtórnego (pomiarowego).

Metoda rozkładu przebiegu w szereg Fouriera

Jako dyskretne reprezentacje przebiegów $h(t)$, $b(t)$ przyjmuje się zwykle amplitudy H_k , B_k i fazy początkowe ϕ_k , β_k poszczególnych harmonicznymi fourierowskiego rozkładu tych przebiegów. Amplitudy i fazy harmonicznymi $h(t)$, $b(t)$ wyznacza się rozkładając najpierw w szeregi Fouriera przebiegi $u_1(t)$, $u_2(t)$, tzn. wyznaczając ich

amplitudy i fazy początkowe U_{1k} , U_{2k} , φ_k , β_k . Na podstawie U_{2k} i β_k , wyznacza się amplitudy i fazy przebiegu scałkowanego:

$$\bar{U}_{2k} = \frac{U_{2k} T}{2\pi k}, \quad \psi_k = \beta_k + \pi/2 \quad (28)$$

Etap ostatni, to przeliczenie U_{1k} , φ_k , U_{2k} , β_k na H_k , φ_k i B_k , ψ_k . Amplitudy harmoniczných prądu i napięcia wyznacza się z próbek za pomocą standardowych procedur FFT (szybkiego przekształcenia Fouriera). Przebiegi czasowe można odtworzyć jako

$$\left. \begin{aligned} h(t) &= H_0 + \sum_{k=1}^M H_k \sin(2\pi f t + \varphi_k) \\ b(t) &= B_0 + \sum_{k=1}^M B_k \sin(2\pi f t + \psi_k) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

gdzie $M = N/2 - 1$ dla N parzystego i $M = (N-1)/2$ (dla N nieparzystego) - liczba wyznaczonych harmoniczných, $f = 1/T$ - częstotliwość.

Pętlę histerezy wyznacza się przez obliczenie wg (29) kolejnych wartości natężenia i indukcji w tych samych chwilach czasu. Pętlę histerezy przedstawia się zwykle w postaci graficznej. Wyznaczanie punktów charakterystycznych pętli histerezy (H_c , B_r , H_m , B_m) polega na wstępnym wyszukaniu wartości zerowych lub ekstremalnych, a następnie dokładnym obliczeniu np. metodą połowienia.

Straty energetyczne na przemagnesowanie próbki (iloczyn częstotliwości i powierzchni pętli histerezy) wyznacza się jako

$$P = \pi f \sum_{k=1}^M k B_k H_k \sin(\varphi_k - \psi_k) \quad (30)$$

Wartość skuteczną natężenia pola (często stosowaną zmienną niezależną charakterystyk magnesowania) oblicza się jako

$$H_{sk} = \sqrt{\sum_{k=1}^M H_k^2} \quad (31)$$

Na podstawie wyznaczonych amplitud i faz przebiegów oraz obliczonych wartości szczytowych wyznacza się przenikalności:

– przenikalność dla wartości szczytowych

$$\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \quad (32)$$

– przenikalność dla podstawowych harmoniczných

$$\mu_1 = \frac{B_1}{\mu_0 H_1} \quad (33)$$

Badanie materiału magnetycznego może więc polegać na wyznaczeniu rozkładów Fouriera przebiegów natężenia i indukcji dla kilku lub kilkunastu amplitud indukcji (natężenia), określeniu parametrów (H_m , B_m , H_{sk} , P , μ_m , itd.) ustalonych w ten sposób pętli histerezy oraz na zestawieniu określonych parametrów postaci żądanych charakterystyk.

Uzwojenie magnesujące jest zasilane prądem z generatora dowolnych wymuszeń sterowanego komputerem. Przy takiej strukturze systemu o jego możliwościach, tzn. realizowanych funkcjach oraz jakości procesów sterowania i pomiarów decydują zastosowane algorytmy przetwarzania sygnałów i obliczeń dostosowane z jednej strony do potrzeb użytkownika a z drugiej - do ograniczeń wynikających z parametrów podzespołów systemu.

Nie zawsze w systemie funkcjonuje generator dowolnych wymuszeń. Jako źródło prądu magnesującego można w zasadzie wykorzystać dowolny generator, jednakże pod warunkiem zapewnienia zadanego trybu wymuszenia prądowego (sinusoidalne natężenie pola) lub napięciowego (sinusoidalna indukcja). Te dwa skrajne porządki magnesowania dają znaczne różnice w wynikach badań, zwłaszcza w wartości strat i w natężeniu pola koercji. Różnice mogą dochodzić nawet do 100%. Bez ścisłego dotrzymania kształtu sygnałów dla przyjętego porządku magnesowania otrzymywane wyniki mogą być zatem mało wiarygodne. System powinien umożliwiać badanie próbek w jednym z tych trybów (zależnie od potrzeb) oraz realizować standardowy program badań polegający na wyznaczaniu: krzywej magnesowania $B_m(H_m)$, krzywej przenikalności $\mu(H_m)$, krzywej stratności $p(B_m)$ oraz

granicznej pętli histerezy $b(h)$, a także parametrów tych krzywych, tzn. przenikalności początkowej μ_p , przenikalności maksymalnej μ_{max} , koercji H_c i remanencji B_r .

6. Przebieg ćwiczenia

6.1. Badanie próbki toroidalnej - wyznaczanie pętli histerezy

Układ pomiarowy należy połączyć wg schematu ideowego jak na rys. 3, przy czym można wykorzystać zestaw pomocniczy połączeń stosowany do aparatu Epsteina (patrz rys. 8), w którym w miejsce przyłączenia uzwojeń magnesującego i pomiarowego aparatu dołączamy odpowiednie uzwojenia próbki toroidalnej.

1. Na podstawie danych układu pomiarowego, próbki i oscyloskopu wyznaczyć współczynniki K_H i K_B . Obraz pętli należy wydrukować (lub sfotografować) i zaznaczyć współrzędne punktów charakterystycznych (B_m , H_m , B_r , H_c).
2. Dokonać obserwacji kształtu krzywej prądu magnesującego i napięcia wtórnego dla charakterystycznych stanów - próbka nienasycona, próbka nasycona.
3. Gdy próbka jest w stanie silnego nasycenia, to podając na wejście "Y" oscyloskopu napięcie bezpośrednio z zacisków uzwojenia wtórnego próbki, można na ekranie obserwować przebieg przenikalności różniczkowej (db/dh) w funkcji natężenia pola H_m . Wykres ten należy wydrukować (lub sfotografować). W opracowanym protokole należy zaznaczyć osie współrzędnych.
4. W tym samym układzie połączeń uruchomić system komputerowy z kartą przetwarzania A/C firmy National Instruments (NI USB-6251) i oprogramowaniem EMAG. Sposób postępowania jest taki sam jak w opisanym dalej szczegółowo badaniu próbki ramowej.

Dane próbki toroidalnej:

Przekrój próbki $S = 6,9 \text{ cm}^2$.

Średnia długość drogi strumienia w próbce $l = 41 \text{ cm}$.

Na próbce nawinięte są uzwojenia pomiarowe i magnesujące. Liczby zwojów: $z_m = 400$, $z_p = 100$.

Materiałem próbki jest blacha krzemowa (czy rzeczywiście?).

6.2. Badanie próbki ramowej

Dane próbki badanej w aparacie Epsteina:

Szerokość paska $W_b = 30 \text{ mm}$

Masa $m = 0,5837 \text{ kg}$

Liczba pasków - 8

Grubość paska - 0,282 mm

Grubość pakietu $t_b = 8 \times 0,282 \text{ mm} = 2,256 \text{ mm}$

Pole przekroju poprzecznego $S = 67,68 \text{ mm}^2 = 67,68 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

Gęstość $\rho = 7650 \text{ kg/m}^3$

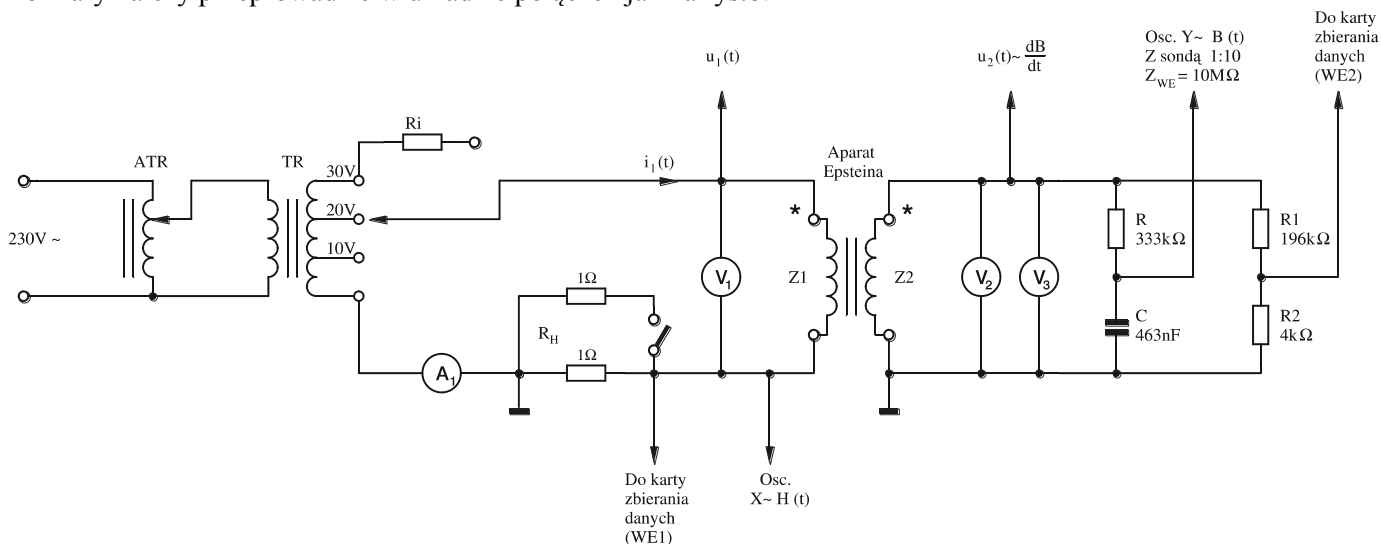
Średnia długość drogi strumienia magnetycznego $l = 94 \text{ cm}$

Liczba zwojów uzwojenia pierwotnego (magnesującego) - 700

Liczba zwojów uzwojenia wtórnego (pomiarowego) - 700

Układ połączeń

Pomiary należy przeprowadzić w układzie połączeń jak na rys.8.



Rys. 8. Układ pomiarowy aparatu Epsteina współpracujący z systemem komputerowym;

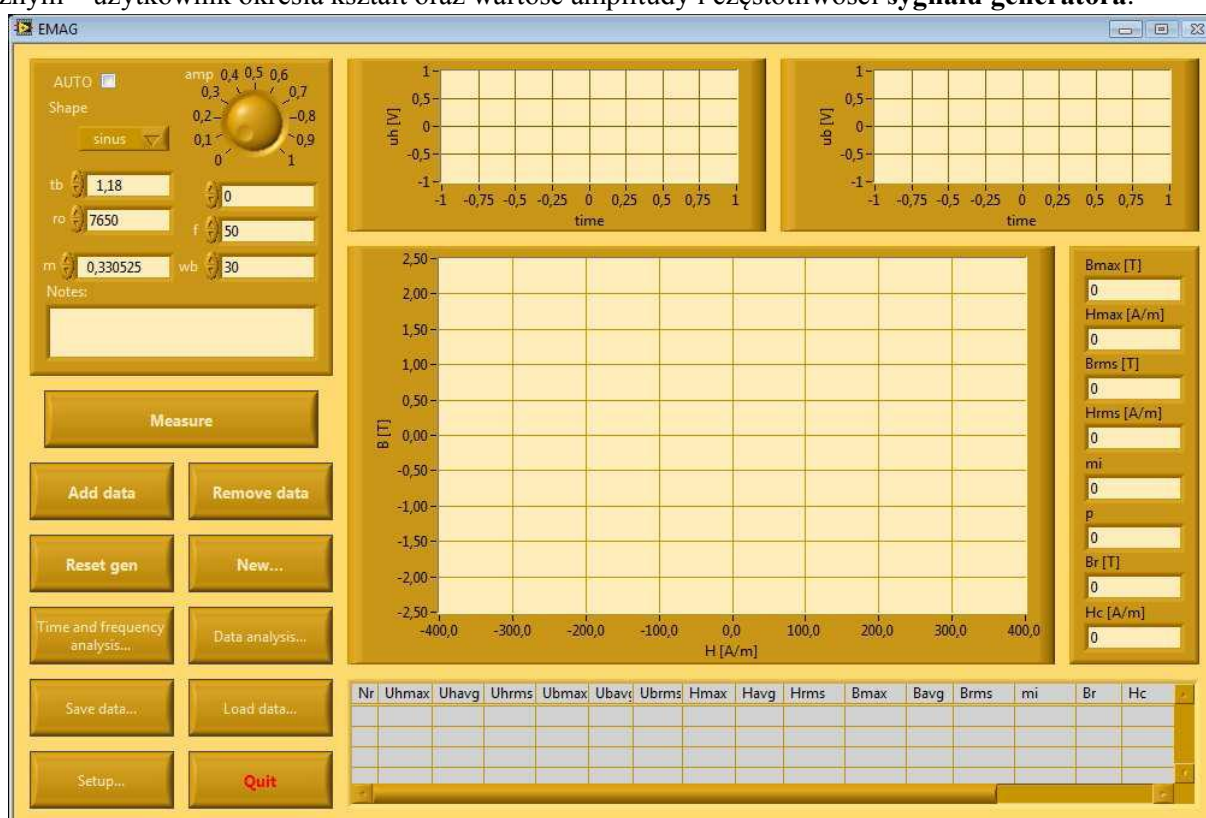
V_1, V_2 - woltomierze wartości skutecznej; V_3 - woltomierz wartości średniej wyskalowany w wartości skutecznej przy $k_k = 1,11$; (częstotłomierz widoczny na schemacie wg. normy PN-EN 60404-2 nie jest tu niezbędny, gdyż częstotliwość napięcia zasilającego $f = 50 \text{ Hz}$)

Panel główny programu EMAG

Po uruchomieniu programu **EMAG** (rys. 9) zostaje wyświetlony panel główny zawierający kontrolki graficzne oraz menu umożliwiające dostęp do pozostałych opcji programu. Na kontrolkach graficznych wyświetlone są podstawowe przebiegi sygnałów – u_h (sygnał proporcjonalny do natężenia pola magnetycznego), u_b (sygnał proporcjonalny do indukcji magnetycznej) oraz pętla histerezy. W polach H_{max} , B_{max} , B_{rms} , H_{rms} , m_i , p , B_r , H_c wyświetlone są parametry materiału dla bieżącego pomiaru.

Usunięcie zestawu danych pomiarowych następuje po ponownym uruchomieniu programu **EMAG** lub wybraniu opcji **New** na panelu głównym. Pomiar można wykonywać w jednym z dwóch trybów (rys. 10):

- automatycznym (AUTO) – w tym trybie użytkownik określa kształt oraz wartość amplitudy i częstotliwości sygnału **indukcji**, do której ma zostać namagnesowana próbka;
- ręcznym – użytkownik określa kształt oraz wartość amplitudy i częstotliwości **sygnału generatora**.



Rys. 9. Panel główny programu EMAG

Opcje dostępne na panelu głównym programu **EMAG**:

AUTO – wybór trybu pomiaru – automatyczny lub manualny; zaznaczenie opcji umożliwia pomiar w trybie automatycznym, próbka magnesowana jest do indukcji o zadanej amplitudzie i częstotliwości;

SHAPE – kształt sygnału (w trybie automatycznym określa kształt sygnału indukcji wzorcowej, w trybie manualnym określa kształt sygnału z generatora);

t_b – grubość próbki w [mm]. Należy wprowadzić sumaryczną grubość wszystkich pasków;

r_o – gęstość próbki w [kg/m³];

f – częstotliwość sygnału w [Hz] (w trybie automatycznym określa częstotliwość sygnału indukcji wzorcowej, w trybie manualnym określa częstotliwość sygnału z generatora);

Notes – dodatkowe informacje dotyczące wykonywanego pomiaru (dane te wraz z wynikami pomiaru zapisywane są do pliku wyjściowego);

Measure – rozpoczęcie pomiaru;

Add data – dodanie wyniku pomiaru do zestawu danych pomiarowych;

Remove data – usunięcie wyniku pomiaru z zestawu danych pomiarowych;

Reset gen – reset generatora (ustawienie amplitudy sygnału z generatora na zero);

New – rozpoczęcie nowego pomiaru;

Time and frequency analysis – wyświetlenie panelu z wynikami analizy czasowej i częstotliwościowej sygnałów;

Data analysis – wyświetlenie panelu z wynikami pomiarów;

Save data – zapis danych pomiarowych do pliku;

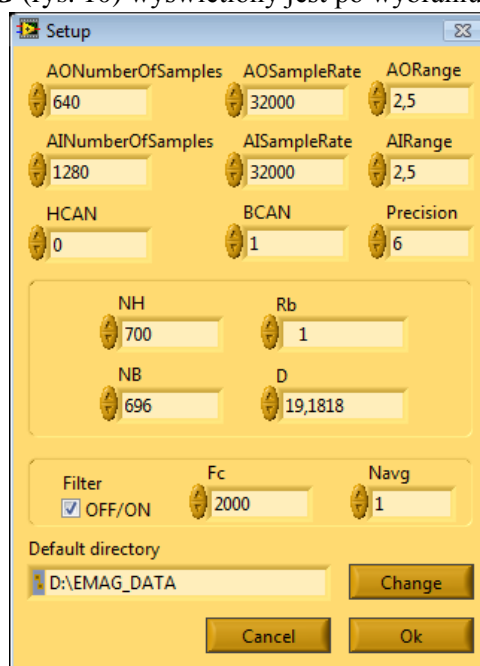
Load data – odczyt danych pomiarowych z pliku;

Setup – ustawienia programu EMAG;

Quit – wyjście z programu EMAG.

Ustawienia programu

Panel z ustawieniami programu **EMAG** (rys. 10) wyświetlony jest po wybraniu opcji **Setup** na panelu głównym.



Rys. 10. Panel z ustawieniami programu EMAG.

Opcje dostępne na panelu **Setup** programu **EMAG**:

AONumberOfSamples – liczba próbek wyjścia analogowego karty DAQ;

AOSampleRate – częstotliwość próbkowania wyjścia analogowego karty DAQ;

AORange – zakres napięciowy wyjścia analogowego karty DAQ;

AINumberOfSamples – liczba próbek wejść analogowych karty DAQ;

AISampleRate – częstotliwość próbkowania wejść analogowych karty DAQ;

AIRange – zakres napięciowy wejść analogowych karty DAQ;

HCAN – numer kanału analogowego karty dla czujnika natężenia pola magnetycznego;

BCAN – numer kanału analogowego karty dla czujnika indukcji magnetycznej;

Precision – liczba cyfr znaczących przy zapisywaniu wyniku pomiarów do pliku;

NH (n_H) – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego aparatu Epsteina;

R_b – wartość rezystancji włączone w szereg z uzwojeniem pierwotnym;

NB (n_B) – liczba zwojów uzwojenia wtórnego aparatu Epsteina;

D – iloraz rezystancji w dzielniku napięciowym;

Filter – włączenie/wyłączenie cyfrowej filtracji sygnałów przy użyciu filtru dolnoprzepustowego wykorzystującego procedury FFT/IFFT;

Fc (f_c) – częstotliwość odcięcia filtra dolnoprzepustowego;

Navg – włączenie/wyłączenie uśredniania sygnałów (Navg = 1 oznacza brak uśredniania);

Default directory – domyślny katalog w którym zapisywane są wyniki pomiarów po wybraniu opcji **Save** na panelu głównym.

Wykonanie pomiarów

Norma przewiduje pomiar strat przy indukcjach $B_m = 1,0$ T, $B_m = 1,5$ T i $B_m = 1,7$ T. Wartość indukcji ustalamy na podstawie wskazań woltomierza wartości średniej wyskalowanego w wartości skutecznej dla przebiegu sinusoidalnego. W tym celu należy posłużyć się wzorem (22). Odchylenie wartości współczynnika kształtu k_k od wartości 1,11 nie powinno być większe niż $\pm 1\%$.

Badana próbka powinna być roz magnesowana zmniejszającym się przemiennym polem magnetycznym zaczynając od poziomu wyższego od zastosowanego w poprzednich pomiarach (wskazanego przez prowadzącego ćwiczenie).

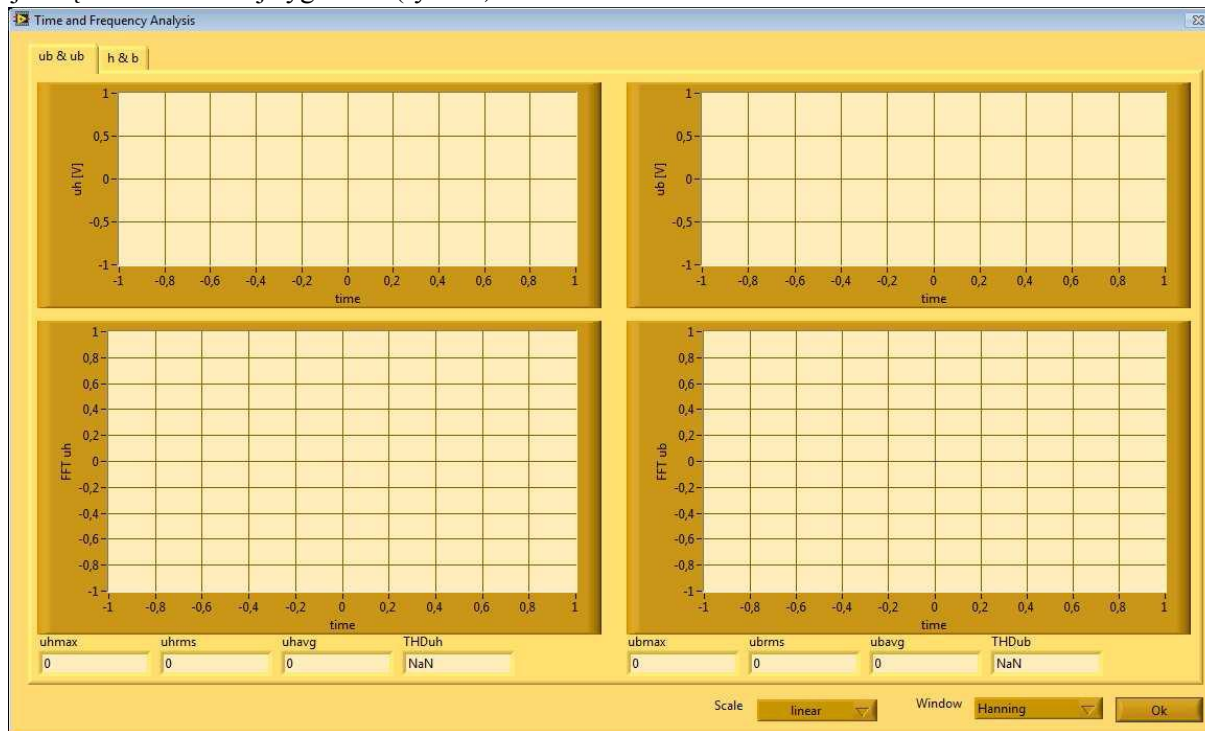
Ustawiając wybraną wartość prądu magnesującego lub wybraną wartość napięcia wtórnego (wartość indukcji w próbce) uruchamiamy proces pomiaru. Pomiar rozpoczyna się po wybraniu opcji **Measure**. Po zakończeniu

pomiaru na panelu głównym wyświetlony jest podgląd sygnałów indukcji oraz natężenia pola magnetycznego. Na panelu głównym wyświetlany jest panel z wynikami pomiarów. Dokumentowanie pomiaru polega na przeniesieniu na drukarkę (lub do pamięci) otrzymanych wyników.

Wyniki pomiaru indukcji B_m otrzymane ze wskazań woltomierza porównujemy z wynikami otrzymanymi za pomocą systemu komputerowego.

Wyniki analizy czasowej i częstotliwościowej sygnałów

Po wybraniu opcji **Time and frequency analysis** na panelu głównym wyświetlony jest panel z wynikami analizy czasowej i częstotliwościowej sygnałów (rys. 11).



Rysunek 11. Panel do obrazowania wyników analizy czasowej/częstotliwościowej programu EMAG

Na kontrolkach graficznych przedstawione są przebiegi czasowe – sygnału z czujnika natężenia pola magnetycznego (u_h), czujnika indukcji magnetycznej (u_b), natężenia pola magnetycznego (h) oraz indukcji magnetycznej (b). Dla w/w sygnałów wyznaczane są wyniki analizy częstotliwościowej – FFT_{u_h} , FFT_{u_b} , FFT_h , FFT_b . Dla wszystkich sygnałów wyświetlane są wartości maksymalne (pola u_{hmax} , u_{bmax} , h_{max} , b_{max}), skuteczne (u_{hrms} , u_{brms} , h_{rms} , b_{rms}), średnie (u_{havg} , u_{bavg} , h_{avg} , b_{avg}) oraz współczynniki odkształceń harmonicznych THD (pola THD_{u_h} , THD_{u_b} , THD_h , THD_b). Wyniki analizy częstotliwościowej można wyświetlić dla wybranej skali (opcja **Scale**) i okna czasowego (opcja **Window**).

Wyniki pomiarów

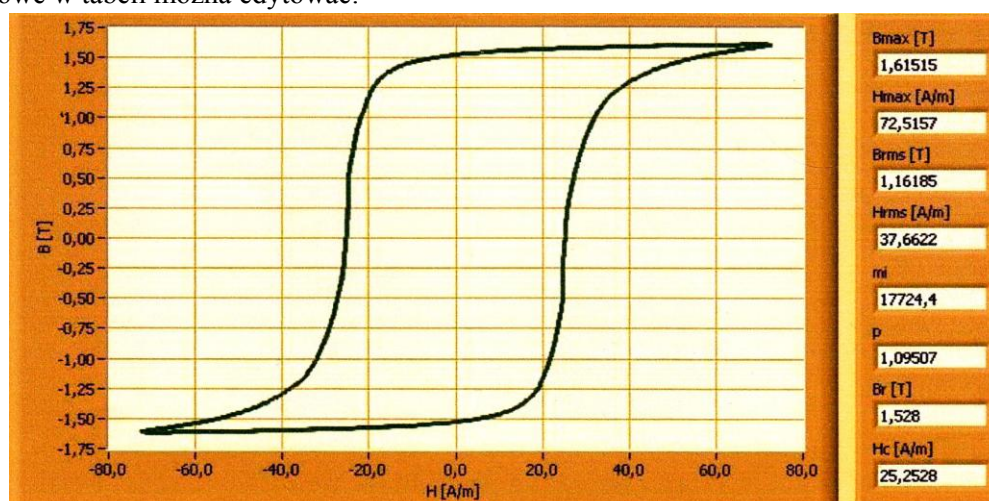
Po wybraniu opcji **Data analysis** na panelu głównym wyświetlony jest panel z wynikami pomiarów (rys. 12). Na panelu wyświetlona jest pętla histerezy $b=f(h)$, krzywa magnesowania $B_{max}=f(H_{max})$, krzywa stratności $p=f(B_{max})$ oraz przenikalności magnetycznej $m_i=f(H_{max})$.



Rysunek 12. Panel do obrazowania wyników pomiarów programu EMAG

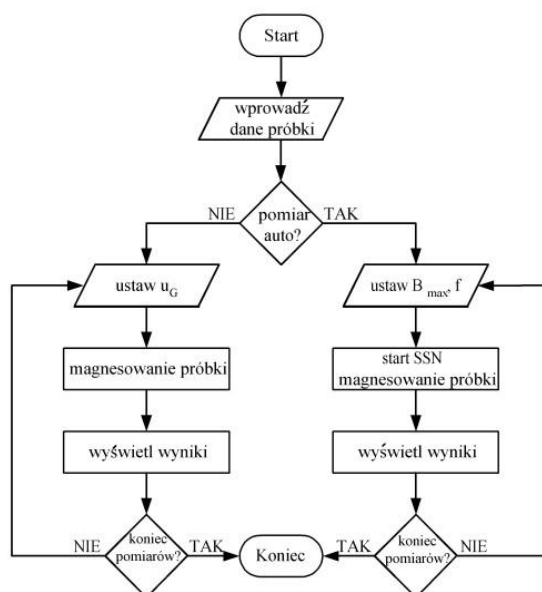
Na zakładce **Data** dane pomiarowe wyświetlone są w postaci tabeli:

U_{hmax} – wartość maksymalna napięcia z czujnika natężenia pola magnetycznego;
 U_{havg} – wartość średnia napięcia z czujnika natężenia pola magnetycznego;
 U_{hrms} – wartość skuteczna napięcia z czujnika natężenia pola magnetycznego;
 U_{bmax} – wartość maksymalna napięcia z czujnika indukcji magnetycznej;
 U_{bavg} – wartość średnia napięcia z czujnika indukcji magnetycznej;
 U_{brms} – wartość skuteczna napięcia z czujnika indukcji magnetycznej;
 H_{max} – wartość maksymalna natężenia pola magnetycznego;
 H_{avg} – wartość średnia natężenia pola magnetycznego;
 H_{rms} – wartość skuteczna natężenia pola magnetycznego;
 B_{max} – wartość maksymalna indukcji magnetycznej;
 B_{avg} – wartość średnia indukcji magnetycznej;
 B_{rms} – wartość skuteczna indukcji magnetycznej;
 M_i – przenikalność magnetyczna względna;
 B_r – indukcja remanencji;
 H_c – natężenie koercji;
 p_m – stratność liczona na podstawie masy materiału;
 p_{ro} – stratność liczona na podstawie objętości materiału;
 p_{avg} – stratność liczona na podstawie przebiegów czasowych $u_h (u_1)$ i $u_b (u_2)$.
 Dane pomiarowe w tabeli można edytować.



Rys. 13. Przykład panelu z obrazem pętli histerezy programu EMAG

Dane z bieżącego pomiaru można dodać/usunąć ze zbioru danych pomiarowych przy użyciu opcji **Add data/Remove data** na panelu głównym.



Rysunek 14. Schemat postępowania po uruchomieniu programu EMAG

6.3. Opracowanie wyników

1. Wydrukować wykres krzywej magnesowania $B_m = f(H_m)$
2. Porównać stratność p_m wyznaczoną dla $B_m = 1 \text{ T} - 1,5 \text{ T} - 1,7 \text{ T}$ z danymi katalogowymi blach elektrotechnicznych. Zidentyfikować badany materiał.
3. Podać interpretację przebiegów czasowych prądu magnesującego i napięcia wtórnego dla próbki nienasyconej i nasyconej.
4. Podać uwagi i spostrzeżenia dotyczące pomiarów.

7. Zagadnienia do samodzielnego opracowania

1. Podać przyczyny powodujące, że szerokość pętli histerezy obserwowanej na ekranie oscyloskopu zależy od kształtu krzywej prądu magnesującego (przy $B_m = \text{const}$).
2. Dlaczego wartość rezystancji opornika R_H (rys. 2, rys. 3, rys. 7) powinna być niewielka?
3. Wykazać, że podając na wejście "Y" oscyloskopu napięcie bezpośrednio z zacisków uzwojenia wtórnego próbki otrzymamy na ekranie wykres przenikalności różniczkowej w funkcji natężenia pola.
4. Wymienić przyczyny powodujące, że norma ogranicza wartości rezystancji zwojów pierwotnych i wtórnych aparatu Epsteina.
5. Naszkicować przebiegi czasowe indukcji i natężenia pola w próbce dla przypadków, gdy dysponujemy źródłem sinusoidalnego sygnału o wymuszeniu: (a) prądowym, (b) napięciowym.
6. Dlaczego kształt wymuszonego sygnału źródła zasilającego układ pomiarowy współpracujący z aparatem Epsteina powinien być sinusoidalny?
7. Czy można układ pomiarowy aparatu Epsteina zasilać napięciem nastawianym za pomocą oporników o regulowanej rezystancji? Podać uzasadnienie odpowiedzi.
8. Czy sinusoidalne wymuszenie napięciowe źródła zawsze oznacza sinusoidalną indukcję w rdzeniu? Podać ograniczenia i warunki dodatkowe.

Literatura

- [1] IEC 60404-2:2008 - Magnetic materials - Part 2: Methods of measurement of magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame.
- [2] EN 60404-2:1998/prA 1:2007 Magnetic materials Part 2: Methods of measurement of magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame.
PN-EN 60404-2:2002 Materiały magnetyczne – Część 2: Metody pomiaru własności magnetycznych blach i taśm stalowych elektrotechnicznych za pomocą aparatu Epsteina.
- [3] Nałęcz M., Jaworski J., Miernictwo magnetyczne. WNT, Warszawa 1968.
- [4] Czajewski J., Podstawy Metrologii Elektrycznej, OW PW, Warszawa 2004