

Laboratorium Półprzewodniki, Dielektryki i Magnetyki

Ćwiczenie 11

Badanie materiałów ferromagnetycznych

dr hab. inż. Tomasz Piasecki (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Podstawowe wielkości oraz parametry charakteryzujące materiały magnetyczne. Związki pomiędzy B , H i M
2. Klasyfikacja materiałów magnetycznych
3. Krzywe magnesowania, histereza
4. Układ do pomiaru pętli histerezy rdzeni toroidalnych, łącznie z prawami pozwalającymi wyznaczyć B i H
5. Ferryty: podstawowe własności, typowe wartości parametrów materiałowych, definicje przenikalności magnetycznych ferrytów
6. Stała indukcyjności rdzenia A_L
7. Zasady projektowania induktora na rdzeniu ferrytowym
8. Magnetostrykcja. Zjawisko Villariego

Spis treści

1	Wstęp	1
2	Układ pomiarowy	3
3	Program ćwiczenia	4
3.1	Przygotowanie do pomiarów	4
3.2	Wyznaczenie pętli histerezy	5
3.3	Wyznaczenie krzywej pierwotnej magnesowania	6
3.4	Wyznaczenie przenikalności magnetycznej i stałej indukcyjności rdzenia	7
3.5	Wyznaczenie energii magnesowania, rozmagnesowania oraz energii traconej przy przemagnesowaniu	7



Katedra
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

W ćwiczeniu przedstawiona jest metoda pomiaru parametrów materiałów ferromagnetycznych. Część praktyczna ćwiczenia obejmuje wyznaczenie parametrów ferromagnetyka przez analizę jego odpowiedzi pobudzenie zmiennym natężeniem pola magnetycznego.

Ferromagnetyki należą do grupy materiałów magnetycznych. W materiałach tych występują domeny magnetyczne, w których momenty magnetyczne sąsiadujących atomów spontanicznie ustawiają się w tym samym kierunku.

Na uporządkowanie kierunków namagnesowania domen można wpływać zewnętrznym polem magnetycznym. Jeśli na początku takiego uporządkowania brak, to materiał nie wykazuje wypadkowego namagnesowania i dla natężenia pola magnetycznego $H = 0$ całkowita indukcja magnetyczna B też będzie równa 0:

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0H + \mu_0\chi_m H = \mu_0\mu_r H \quad (1)$$

gdzie: M – magnetyzacja, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, χ_m – podatność magnetyczna, μ_r – przenikalność magnetyczna względna.

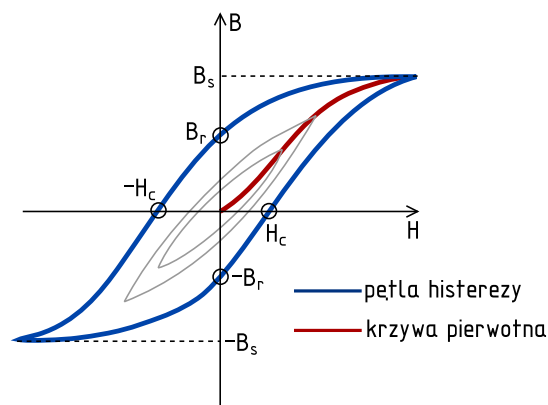
Wraz ze wzrostem natężenia zewnętrznego pola magnetycznego następuje stopniowe porządkowanie domen w kierunku zgodnym z kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego, co powoduje znaczny wzrost magnetyzacji. Podatność magnetyczna ferromagnetyków jest zazwyczaj bardzo duża, 1000, 10 000 lub więcej, przez co w równaniu (1) dominuje czynnik $\mu_0\chi_m H$, związany z materiałem.

Po osiągnięciu maksymalnego uporządkowania dalszy wzrost indukcji magnetycznej jest zahamowany, a jej maksymalną wartość nazywamy indukcją nasycenia B_s . Zależność indukcji od natężenia pola magnetycznego jest zatem nieliniowa. Jej wykres dla materiału wstępnie rozmagnesowanego nazywamy krzywą pierwotną magnesowania. Jej przykładowy przebieg pokazano na rysunku 1.

Po obniżeniu zewnętrznego pola magnetycznego do zera domeny ferromagnetyczne pozostają uporządkowane w pewnym stopniu, zależnym od rodzaju materiału magnetycznego. Skutkuje to występowaniem pewnej indukcji magnetycznej przy powierzchni materiału przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, nazywanej remanencją bądź pozostałością magnetyczną B_r . Jeśli chcielibyśmy obniżyć indukcję magnetyczną tak namagnesowanego materiału do zera, trzeba zadziałać zewnętrznym polem magnetycznym o natężeniu H_c (natężenie pola koercji, natężenie powściągające), skierowanym przeciwnie do pola magnetycznego, które wywołało namagnesowanie.

Materiał posiadający takie właściwości będzie nieliniowo reagował na zmiany natężenia zewnętrznego pola magnetycznego, a zależność $B = f(H)$ będzie wykazywała histerezę. Jej przykładowy przebieg pokazano na rysunku 1.

Ma ona taki kształt tylko w wypadku zmian zewnętrznego pola magnetycznego na tyle silnych, by przy przemagnesowaniu materiału doszło w nim do nasycenia. Jeśli tak nie jest, oka histerezy są węższe, zależność $B = f(H)$ jest bardziej liniowa, a wierzchołki wykresów tej zależności dość dokładnie odwzorowują przebieg krzywej pierwotnej magnesowania. Fakt ten wykorzystany jest w ćwiczeniu do wyznaczenia jej przebiegu.



Rysunek 1: Przykładowa pętla histerezy i krzywa pierwotna namagnesowania ferromagnetyka

Nachylenie krzywej pierwotnej magnesowania odpowiada wartości przenikalności magnetycznej bezwzględnej μ .

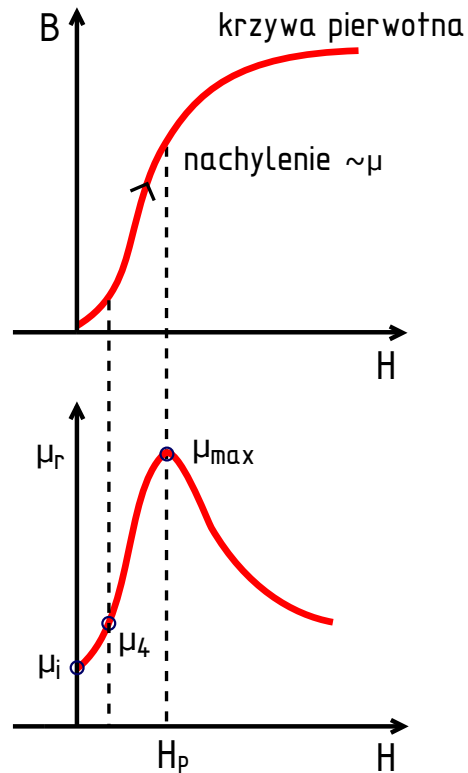
$$\mu = \mu_r \mu_0 = \frac{dB}{dH} \quad (2)$$

Jak widać na rysunku 2, nachylenie to zmienia się wraz ze zmianami natężenia pola magnetycznego H . Różniczkując krzywą pierwotną można otrzymać zależność przenikalności magnetycznej od natężenia pola magnetycznego H . Dla trzech konkretnych wartości H definiuje się trzy przenikalności magnetyczne, możliwe do wyznaczenia na podstawie krzywej pierwotnej magnesowania:

$$\mu_i = \left. \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \right|_{H \rightarrow 0} \quad (3)$$

$$\mu_{max} = \left. \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \right|_{H=H_p} \quad (4)$$

$$\mu_4 = \left. \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \right|_{H=0.4 \frac{A}{m}} \quad (5)$$



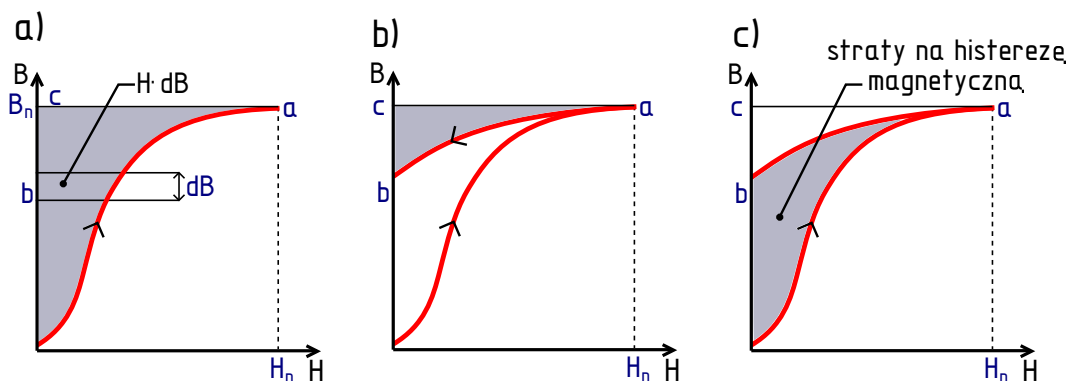
Rysunek 2: Krzywa pierwotna magnesowania i zależność przenikalności magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego.

gdzie μ_i to przenikalność względna początkowa, μ_{max} to przenikalność względna maksymalna, μ_4 to przenikalność względna dla pola magnetycznego o natężeniu $4 \frac{A}{m}$.

Pętle histerezy i krzywa pierwotna magnesowania pozwalają na obliczenie energii pola magnetycznego poprzez całkowanie pól pomiędzy charakterystycznymi częściami wykresów (rysunek 3).

$$W = \int_0^{B_n} H dB \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (6)$$

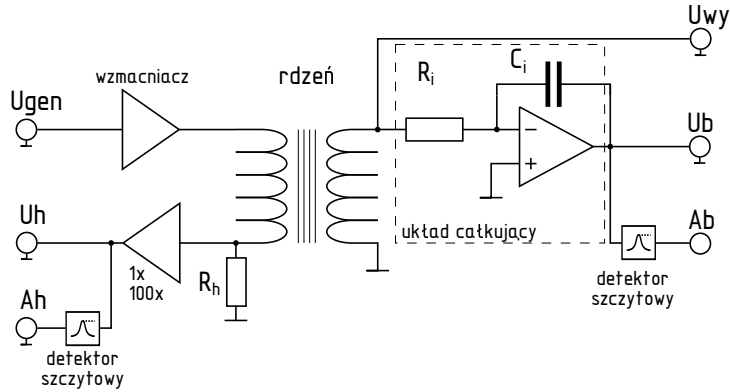
Można w ten sposób obliczyć energię magnesowania, rozmagnesowania. Ich różnica daje wartość energii, która została utracona przy przemagnesowaniu magnetyka i rozproszona w postaci ciepła.



Rysunek 3: Wyznaczenie energii: a) magnesowania, b) rozmagnesowania, c) przemagnesowania

2 Układ pomiarowy

Schemat układu do pomiaru pętli histerezy przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4: Uproszczony schemat stanowiska pomiarowego

Do wejścia U_{gen} podłącza się generator funkcyjny. Napięcie z tego wejścia jest wzmacniane i podawane na uzwojenie pierwotne transformatora nawiniętego na rdzeń toroidalny wykonany z badanego materiału magnetycznego. Układ pomiarowy wyposażony jest w podstawkę umożliwiającą szybką wymianę badanego rdzenia.

Szeregowo z uzwojeniem pierwotnym połączony jest rezystor R_h , służący jako bocznik do pomiaru natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym. Wartość rezystancji tego bocznika może być zmieniana przełącznikami umieszczonymi na makiiecie.

Napięcie na tym rezystorze jest proporcjonalne do natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym. Dodatkowo, układ pomiarowy wyposażono we wzmacniacz napięciowy o przełączanym wzmacnieniu k_h równym $1\times$ lub $100\times$. Napięcie U_h z wyjścia tego wzmacniacza wyprowadzono na złączu makiety. Znając napięcie U_h można obliczyć natężenie pola **magnetycznego w rdzeniu** H :¹

$$H = \frac{N_{we}}{R_h l_e k_w} U_h \left[\frac{A}{m} \right] \quad (7)$$

gdzie: N_{we} – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, l_e – efektywna długość drogi strumienia magnetycznego, U_h – napięcie na wyprowadzeniu makiety, k_w - wybrane wzmacnienie.

Indukcja magnetyczna w rdzeniu mierzona jest za pośrednictwem uzwojenia wtórnego. Całka z napięcia (U_{wy}) na tym uzwojeniu jest proporcjonalna do indukcji magnetycznej² wg zależności:

$$B = \frac{1}{N_{wy} A_e} \int U_{wy} dt [T] \quad (8)$$

gdzie: N – liczba zwojów uzwojenia wtórnego, A_e – efektywne pole przekroju poprzecznego rdzenia, U_{wy} – napięcie na uzwojeniu wtórnym.

Wartość całki z napięcia U_{wy} można określić numerycznie, posługując się odpowiednim oprogramowaniem. Inną metodą jest zastosowanie analogowego układu całkującego RC, który również znajduje się na makiiecie. Napięcie wyjściowe takiego układu wynosi:

$$U_b = \frac{1}{\tau_i} \int U_{wy} dt [V] \quad (9)$$

, gdzie τ_i to stała czasu układu całkującego, równa $\tau_i = R_i \cdot C_i$. Makieta została skonstruowana tak, aby można było wybrać wartości rezystora R_i i kondensatora C_i zmieniając tym

¹Udowodnij słuszność podanego równania.

²Uzasadnij to twierdzenie na podstawie znanych Ci praw fizyki.

samym stałą czasu układu całkującego poprzez zmiany położenia przełączników powodujących równoległe łączenie umieszczonych na makiecie elementów.

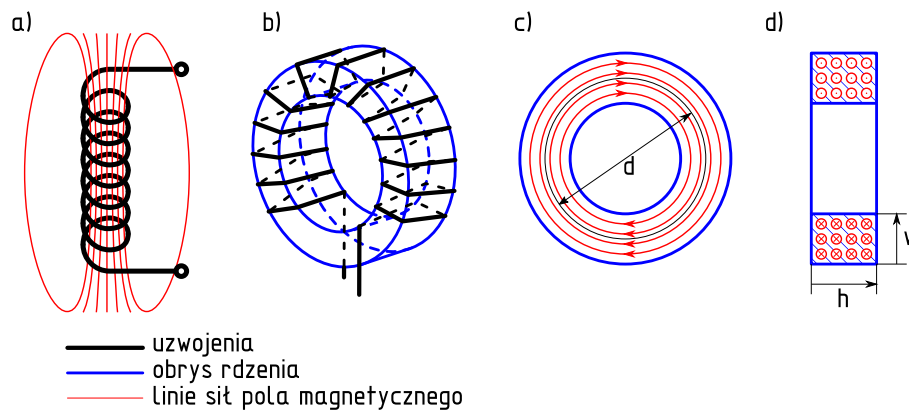
Jak wynika z połączenia z równań (8) i (9), możliwe jest uzyskanie U_b wprost proporcjonalnego do wartości **indukcji magnetycznej**:

$$B = \frac{R_i C_i}{N_{wy} A_e} U_b [T] \quad (10)$$

Dla ułatwienia pomiaru amplitud napięć U_h i U_b makietę wyposażono również w układy detektorów szczytowych. Są to układy, których napięcie wyjściowe równe jest wartości maksymalnych przebiegów podawanych na ich wejścia. Wyjścia układów detektorów szczytowych wyprowadzono na złącza bananowe A_h i A_b .

Wymiary rdzenia, zawarte w powyższych wzorach, zależą od geometrii badanego obwodu magnetycznego. Od niej bowiem zależy długość i przekrój, jaki zajmują linie sił pola magnetycznego.

Dla tzw. rdzenia toroidalnego (nie jest to w ścisłym znaczeniu toroid, ponieważ jego przekrój jest w przybliżeniu prostokątny, a nie kołisty) wymiary te są proste do określenia (rysunek 5).



Rysunek 5: Proste obwody magnetyczne: a) solenoid, b) widok ogólny rdzenia toroidalnego z uzwojeniem, c) przekrój rdzenia toroidalnego w płaszczyźnie toroidu, d) przekrój rdzenia toroidalnego poprzeczny do linii sił pola magnetycznego

Linie sił pola we wnętrzu prostego solenoidu przebiegają równoległe do jego osi i są prostopadłe do płaszczyzny każdego ze zwojów (rysunek 5a). Jeśli podobne uzwojenie zostanie nawinięte na rdzeniu toroidalnym (rysunek 5b), to nadal linie sił pola będą prostopadłe do płaszczyzny zwojów i będą przebiegały wewnątrz pierścienia toroidu. Długość drogi strumienia magnetycznego można zatem wyznaczyć, obliczając obwód okręgu leżącego w połowie grubości toroidu (rysunek 5c), a przekrój rdzenia na podstawie jego szerokości h i wysokości w (rysunek 5d).

3 Program ćwiczenia

Prowadzący zajęcia daje do pomiarów jeden z rdzeni magnetycznych z nawiniętymi uzwojeniami i umocowany w podstawce oraz określa częstotliwość pomiarową f_{pom} , $50 \text{ Hz} \leq f_{pom} \leq 10 \text{ kHz}$.

3.1 Przygotowanie do pomiarów

Prowadzący zajęcia wybiera rdzeń toroidalny, który będzie mierzony oraz podaje częstotliwości zmiennego pola magnetycznego, przy których rdzeń ma być badany. Prowadzący ustala też położenia przełączników służących do wybrania rezystorów R_h i R_i oraz ustala wzmocnienie k_w .

Wyznaczenie parametrów rdzenia

Posługując się suwmiarką należy wyznaczyć wymiary d , w i h rdzenia toroidalnego wyrażając je w metrach, oraz policzyć zwoje uzwojeń pierwotnego i wtórnego. Uzwojenie pierwotne ma swoje wyprowadzenia po stronie wycięcia w podstawie.

Obliczenie wartości elementów układu całkującego

Należy obliczyć wartość R_i na podstawie położenia przełączników rzutujących na jego wartość. Następnie trzeba dobrać wartość kondensatora C_i w układzie całkującym tak, aby stała czasu układu całkującego nie była mniejsza od okresu sygnału pomiarowego.

$$R_i C_i \geq \frac{1}{f_{pom}} \quad (11)$$

Kondensatory obwodu całkującego włącza się stosownymi przełącznikami oznaczonymi wartościami pojemności. Włączenie kilku z nich powoduje równoległe połączenie wybranych kondensatorów.

Obliczenie współczynników skalowania

Oblicz wartość rezystora R_h na podstawie położenia przełączników. Równania 7 i 10 wskazują sposób przeliczania mierzonych napięć. Bazując na wartościach rezystancji i pojemności, pomiarach wymiarów rdzenia i zliczeniu zwojów obu uzwojeń, należy wyliczyć wartości:

$$k_H = \frac{N_{we}}{R_{we} l_e k_w} \left[\frac{A}{mV} \right] \quad (12)$$

$$k_B = \frac{R_{wy} C_{wy}}{N_{wy} A_e} \left[\frac{T}{V} \right] \quad (13)$$

Współczynniki te posłużą do przeliczania mierzonych napięć na H i B :

$$H = k_H U_H \quad (14)$$

$$B = k_B U_B \quad (15)$$

3.2 Wyznaczenie pętli histerezy

Pętlę histerezy wyznacza się korzystając z układu opisanego we wstępie analizując komputerowo przebiegi zarejestrowane za pomocą oscyloskopu. Aby je uzyskać:

1. Układ makiety należy zasilić z zasilacza laboratoryjnego napięciem symetrycznym $\pm 15 V$ z ograniczeniem prądowym 0,5 A.
2. Wyjście sygnału z generatora funkcyjnego należy połączyć z wejściem U_{gen} zestawu do pomiaru pętli histerezy i włączyć generację przebiegu sinusoidalnego bez składowej stałej o zadanej częstotliwości.
3. Wyjście synchronizacji z generatora funkcyjnego połączyć z wejściem wyzwalań zewnętrznego oscyloskopu.
4. Wyjście U_h układu pomiarowego połączyć należy z wejściem kanału pierwszego oscyloskopu sprzęgając go stałoprądowo.
5. Drugi kanał oscyloskopu należy połączyć z wyjściem U_b układu pomiarowego sprzęgając go stałoprądowo.
6. Oscyloskop przełączyć w tryb pracy XY (menu pod klawiszem Main/Delayed).

7. Regulując amplitudą sygnału z generatora i wzmocnieniami kanałów oscyloskopu należy na ekranie oscyloskopu uzyskać pętlę histerezy z widocznym nasycaniem się rdzenia (patrz rysunek 1). Jeśli będzie widoczna składowa stała o znacznej wartości w obserwowanych przebiegach konieczne będzie wyregulowanie makiety, którą dokonuje prowadzący ćwiczenia.
8. Należy ustalić amplitudę A_{max} sygnału z generatora na wartość, przy której na pętli histerezy obserwowanej na oscyloskopie będzie wyraźnie widoczne nasycanie się rdzenia. Wartość A_{max} należy zapisać.
9. Uruchomić program do akwizycji danych **Histereza**, w którym należy podać parametry pomiaru oraz liczbę uśrednień. Uśrednianie pozwala na zredukowanie szumu w rejestrowanym przebiegu. Ich liczbę należy dostosować do potrzeb. Zwiększenie liczby uśrednień $4\times$ redukuje szum około dwukrotnie. W pliku zapisywanym pod koniec pomiaru będą znajdowały się wartości U_h i U_b .
10. Akwizycja danych powoduje przełączenie oscyloskopu i generatora w tryb pracy zdalnej. Po skończonej akwizycji danych **przełączyć oscyloskop i generator w tryb pracy autonomicznej klawiszem LOCAL**.

Pobrane dane należy zaimportować do nowego arkusza w projekcie Origin. Zmierzone wartości U_h i U_b przeliczyć na H i B na podstawie (14) i (15). Sporządzić wykres pętli histerezy, wyznaczyć indukcyjność nasycenia, remanencję magnetyczną i natężenie pola koercji. Na koniec należy odnieść otrzymane wartości do typowych parametrów ferrytowych rdzeni magnetycznych.

3.3 Wyznaczenie krzywej pierwotnej magnesowania

Krzywa pierwotna magnesowania wyznaczana jest przez punkty maksymalnej indukcji i natężenia pola pętli histerezy mierzonych przy różnych napięciach sygnału z generatora. Wiadomo również, że przechodzi ona przez punkt $B = 0, H = 0$.

Pomiar krzywej pierwotnej magnesowania polega na wyznaczeniu zależności maksimum wartości indukcji magnetycznej od maksimum natężenia pola magnetycznej przy stopniowym zwiększaniu natężenia prądu przemiennego wywołującego powstanie pola magnetycznego w rdzeniu. Można to zrobić ręcznie bądź korzystając z automatycznej akwizycji danych. Niezależnie od metody wynikiem pomiaru są wartości amplitud A_h i A_b napięć U_h i U_b . Po pomiarze A_h i A_b trzeba przeliczyć na wartości H i B na podstawie (14) i (15).

Krzywą pierwotną magnesowania należy wykreślić na osobnym wykresie oraz dodatkowo nałożyć ją na wcześniej wyznaczoną pętlę histerezy.

Pomiar krzywej pierwotnej magnesowania przy użyciu oscyloskopu

1. Układ pomiarowy zestawić identycznie, jak w punkcie 3.2.
2. Ustawić amplitudę sygnału z generatora na około 50 mV.
3. Przełączyć oscyloskop w tryb YT, uzyskać stabilny obraz (Auto Scale). Upewnić się, że oba kanały pracują w trybie sprzężenia stałoprądowego.
4. Korzystając z funkcji automatycznego pomiaru napięć, zmierzyć amplitudę **międzyszczytową** (czyli $2\times$ większą od amplitudy potrzebnej do obliczeń) przebiegów napięć U_h i U_b przy amplitudach sygnału z generatora ustawianych w zakresie $50\text{ mV} \leq A \leq A_{max}$. Napięcie na generatorze należy początkowo zwiększać z krokiem 50 mV. Należy wyznaczyć 20-30 punktów. Wartości mierzonych napięć należy wpisać do sprawozdania i do nowego arkusza w projekcie Origin.

Zautomatyzowany pomiar krzywej pierwotnej magnesowania

1. Układ pomiarowy połączyć jak w punkcie 3.2 dodatkowo dołączając dwa multimetry cyfrowe Agilent 34401A do złącz A_h i A_b makiety. Są to wyjścia detektorów szczytowych, których napięcia odpowiadają wartościom maksymalnym napięć U_h i U_b .
2. Uruchomić program **Pierwotna** i podać w nim parametry pomiaru. Liczbę punktów krzywej pierwotnej dostosować do potrzeb.
3. Korzystając z przycisku „Identyfikacja przyrządów” można spowodować pojawienie się na wyświetlaczach multimetrów nazw napięć, jakie rejestrują, co pozwala zweryfikować prawidłowość ich połączenia z makieta.
4. Uruchomić pomiar. W trakcie pomiaru wykreślana jest bieżąca zależność A_b od A_h . Po skończonym pomiarze zapisywany jest plik z wartościami napięć na generatorze oraz zmierzonymi A_h i A_b .

3.4 Wyznaczenie przenikalności magnetycznej i stałej indukcyjności rdzenia

Przenikalność magnetyczną i jej zależność od natężenia pola magnetycznego można wyznaczyć na podstawie analizy krzywej pierwotnej magnesowania (rysunek 2).

1. Wyznaczyć zależność $\mu_r = f(H)$ różniczkując krzywą pierwotną magnesowania przy użyciu programu Origin (rysunek 2) i dzieląc otrzymane wartości przez μ_0 . **Uwaga!** Zazwyczaj różniczkowanie należy poprzedzić wygładzeniem zmierzonej krzywej pierwotnej magnesowania. Proponowana metoda polega na przybliżeniu jej przebiegu wielomianem wysokiego (np 9.) stopnia i zróżniczkowanie krzywej będącej wynikiem tego dopasowania. Wykonując dopasowanie należy spowodować, aby jego przecięcie z osią Y wypadało w 0 (*Fit Options* → *Fix Intercept*) oraz spowodować, aby krzywa dopasowania była wyliczona od wartości $H = 0$ (*Fitted Curves Plot* → *X Data Type* → *Range: Custom, Min=0*).
2. Wyznaczyć wartości μ_i , μ_{max} , μ_4 na podstawie (3), (4) i (5).
3. Odnieść otrzymane wartości przenikalności do wartości typowych dla materiałów ferrytowych.
4. Z zależności:

$$A_L = \frac{\mu_e}{\sum \frac{l}{A}} \mu_0 \quad (16)$$

wyznaczyć A_L , gdzie: μ_e – przenikalność efektywna (dla rdzenia bez szczeliny powietrznej równa jest μ_i). Występująca w powyższym wyrażeniu suma jest sumą stosunków długości do przekroju wszystkich obwodów magnetycznych rdzenia. Rdzenie toroidalne mają jeden obwód magnetyczny.

3.5 Wyznaczenie energii magnesowania, rozmagnesowania oraz energii traconej przy przemagnesowaniu

Energie magnesowania, rozmagnesowania oraz energii traconej przy przemagnesowaniu można wyznaczyć poprzez całkowanie numeryczne odpowiednich przebiegów (rysunek 3) używając do tego celu programu Origin.

Jeżeli w trakcie ćwiczenia wyznaczono jedynie pętlę histerezy możliwa do wyznaczenia jest tylko energia rozmagnesowania. Mając krzywą pierwotną można obliczyć energię magnesowania. Dokładne wyznaczenie strat na przemagnesowanie możliwe jest tylko wtedy, gdy przebiegi pętli histerezy i krzywej pierwotnej są zgodne.

Literatura

- [1] Materiały do wykładu Dielektryki i Magnetyki
- [2] Katalog wyrobów ferrytowych firmy Ferroxcube: „FERROXCUBE, Soft ferrites and Accessories”, <http://www.ferroxcube.com>
- [3] Marian Soiński, „Materiały magnetyczne w technice”, Biblioteka Centralnego Ośrodka Szkolenia i Wydawnictw SEP, 2001, ISBN 83-915103-5-2