

INDUKCJA ELEKTROMAGNETYCZNA
Wyznaczanie indukcyjności solenoidu

I. Wstęp

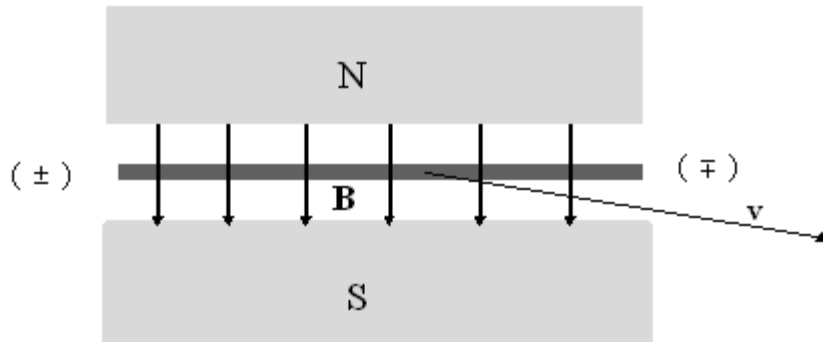
Niech w jednorodnym polu magnetycznym o **indukcji \mathbf{B}** , patrz rys. 1, porusza się z prędkością \mathbf{v} przewodnik. Pod wpływem **siły Lorentza**

$$\mathbf{F} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad 1)$$

gdzie $\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$ i $\mathbf{F} \perp \mathbf{B}$, elektrony (o ładunku e) płyną wzdłuż przewodnika, wtedy jeden jego koniec ładuje się dodatnio (stąd elektrony odpływają), a drugi ujemnie (tam elektrony dopływają). Znak ładunku przy ustalonym \mathbf{B} zależy od kierunku ruchu przewodnika, a tym samym od siły \mathbf{F} , której moduł

$$F = evB \sin(\nu; B).$$

Jeżeli $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$, wówczas $\sin(\nu; B) = 1$, a $F = evB$ jest maksymalną wartością siły.



Rys.1.

Przepływ ładunków trwa tak długo aż siła Lorentza 1) zostanie zrównoważona przez **siłę elektryczną**

$$\mathbf{F}' = e\mathbf{E}, \quad 2)$$

pochodzącą od pola elektrycznego, o **natężeniu \mathbf{E}** , wytworzonego między końcami przewodnika. Przepływ elektronów zostaje wyhamowany, gdy $F' = F$.

Warunek równowagi da się przedstawić równaniem

$$eE = ev \times B,$$

a stąd

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad 3)$$

Napięcie między końcami przewodnika

$$U = \int_r E dl = -\varepsilon, \quad 4)$$

gdzie: dl jest elementem przewodnika, a ε **siłą elektromotoryczną**.

Uwzględniając zależność 3), równanie 4) możemy zapisać w postaci:

$$\varepsilon = - \int_r (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) dl. \quad 5)$$

Elektryczność
Zauważmy, że

$$(v \times B)dl = B(dl \times v) = B(dl \times dr/dt),$$

gdzie: $v = dr/dt$. We współrzędnych kartezjańskich wektory: \mathbf{B} , $d\mathbf{l}$, $d\mathbf{r}/dt$ przyjmą postać:

$$B = B_x i + B_y j + B_z k$$

6a)

$$d\mathbf{l} = dl_x i + dl_y j + dl_z k$$

6b)

$$d\mathbf{r}/dt = dx/dt i + dy/dt j + dz/dt k \quad 6c)$$

Utwórzmy wyznacznik:

$$\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ dl_x & dl_y & dl_z \\ dx/dt & dy/dt & dz/dt \end{vmatrix} = d/dt \begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ dl_x & dl_y & dl_z \\ x & y & z \end{vmatrix} = d/dt [B(dl \times r)],$$

gdzie przyjęliśmy, że \mathbf{B} i $d\mathbf{l}$ są niezależne od czasu, ponadto założmy, że funkcje 6a), 6b) oraz promień wodzący 6c) są jednostajnie ciągłe, wówczas możemy zamienić kolejność operacji całkowania i różniczkowania. Wtedy

$$\varepsilon = - \int_r d/dt [B(dl \times r)] = -d/dt \int_s B dS,$$

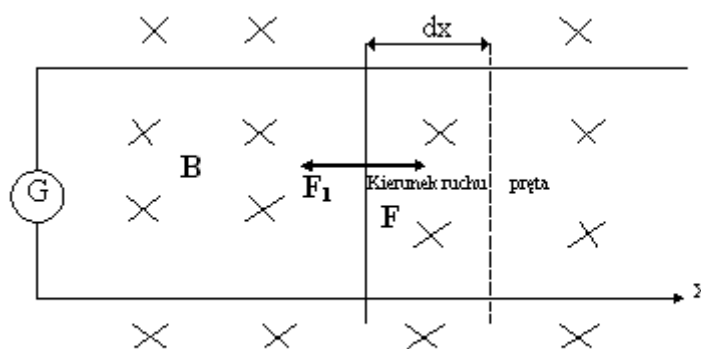
gdzie: $dl \times r = dS$ jest elementem powierzchniowym powierzchni S rozpiętej na krzywej zamkniętej Γ . Ponieważ

$$\Phi = \int_s B dS \quad 6)$$

jest **strumieniem indukcji magnetycznej**, to

$$\varepsilon = -d\Phi/dt. \quad 7)$$

Okazuje się, że **miarą siły elektromotorycznej indukcji jest pochodna strumienia indukcji magnetycznej względem czasu.**



Rys.2.

Rozważmy obwód elektryczny taki, jaki przedstawiono na rysunku 2. W jednorodnym polu magnetycznym o indukcji \mathbf{B} , prostopadłym do płaszczyzny kartki, umieszczono prostokątną ramkę z drutu, w której jeden bok jest ruchomy. Ramkę przecięto i włączono galwanometr G. Działając siłą \mathbf{F} na ruchomy przewodnik przesunęliśmy go, zwiększając powierzchnię ramki.

Elektryczność

Zmienił się strumień indukcji magnetycznej, ponieważ zmieniła się powierzchnia obejmowana przez obwód i w obwodzie pojawiła się siła elektromotoryczna indukcji. W ramce popłynął prąd indukcyjny o natężeniu I . Wskazówka galwanometru wychyliła się. Obwód mieści się w zewnętrznym polu magnetycznym, więc na przewodniki z prądem działa **siła elektrodynamiczna**, w tym na część ruchomą, siła F_1 . Aby przesunąć pręcik o odcinek dx należy przeciwko tej sile wykonać pracę

$$dW = -Fdx,$$

bo $F = -F_1$, przy czym

$$F_1 = BIl,$$

gdzie I oznacza natężenie prądu indukcyjnego, a l długość ruchomego przewodnika. Łatwo zauważyć, że

$$dW = -BIldx, \quad 8)$$

ale $ldx = dS$, jest polem powierzchni, zakreślonym przez ruchomy przewodnik o długości l . Z drugiej strony, prąd o natężeniu I płynący w obwodzie, wykonuje pracę

$$dW = \varepsilon_i I dt, \quad 9)$$

gdzie: ε_i jest **siłą elektromotoryczną indukcji**, a dt nieskończenie małym przedziałem czasu. Praca prądu indukcyjnego 9) ostatecznie przekształca się w energię wewnętrzną, która ogrzewa elementy obwodu i rozprasza się w środowisku. Zgodnie z zasadą zachowania energii prace opisane wzorami 8) i 9) są sobie równe, zatem

$$\varepsilon_i Idt + -BIldx = -IBdS = -Id\Phi,$$

gdzie: $d\Phi = BdS$ jest zmianą strumienia indukcji magnetycznej obejmowanego przez obwód. Po prostym przekształceniu dostajemy siłę elektromotoryczną indukcji

$$\varepsilon_i = -d\Phi / dt. \quad 10)$$

Wzory 7) i 10) można uogólnić również na przypadek zmienności pola magnetycznego. Aby w obwodzie czy przewodniku zaindukowała się siła elektromotoryczna indukcji należy wytworzyć zmienny strumień indukcji magnetycznej obejmujący obwód lub przewodnik. Wychodząc z definicji miary strumienia 6), łatwo zauważyć, że zmianę strumienia możemy wywołać przez zmianę pola powierzchni obejmowanej przez obwód, przez zmianę wektora indukcji magnetycznej, bądź przez zmianę jednej i drugiej wielkości. Wartość siły elektromotorycznej indukcji zależy od szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej. Jeżeli obwód zamkniemy, wówczas popłynie prąd indukcyjny o natężeniu I , przy czym

$$I = \varepsilon_i / R, \quad 11)$$

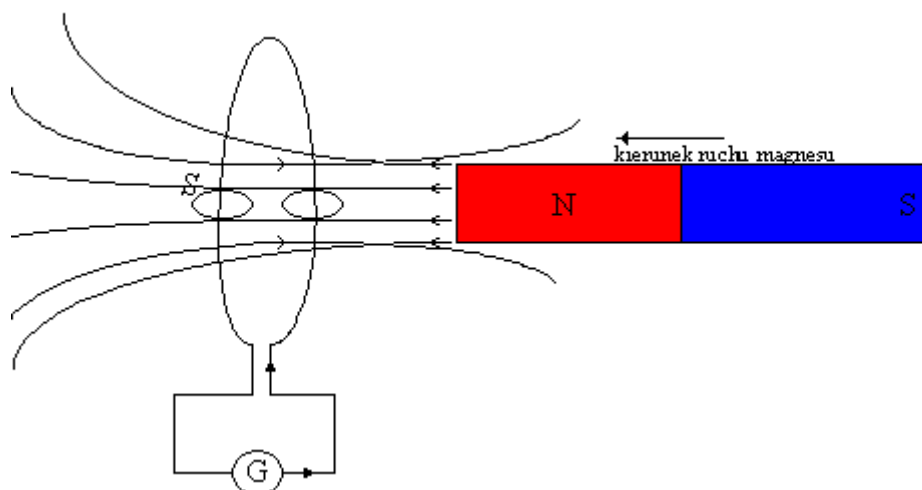
gdzie: R jest **oporem elektrycznym** obwodu.

Jeżeli obwód składa się z n zwojów, wówczas wzór 10) możemy zapisać w postaci:

$$\varepsilon_i = -nd\Phi / dt. \quad 12)$$

Elektryczność

W każdym zwoju indukuje się siła elektromotoryczna indukcji niezależnie od obecności pozostałych. Ponieważ zwoje połączone są szeregowo, to siła elektromotoryczna zaindukowana w całym obwodzie jest sumą sił elektromotorycznych zaindukowanych oddzielnie w każdym zwoju. Znak minus występujący we wzorach 7), 10) i 12) określa pewnego rodzaju przeciwieństwo, między kierunkiem zmian strumienia indukcji magnetycznej wzbudzającego siłę elektromotoryczną w obwodzie zamkniętym, a kierunkiem zmian pola magnetycznego wytworzonego przez prąd indukcyjny. Jeżeli pole zewnętrzne narasta, to kierunek prądu jest taki, że pole przez niego wytworzone jest skierowane przeciwnie i powoduje osłabienie pola zewnętrznego. Jeżeli pole zewnętrzne maleje, wówczas...kierunek prądu zmienia się i jego pole magnetyczne jest zgodne, i podtrzymuje zanikające pole zewnętrzne. Możemy sformułować regułę określającą kierunek prądu indukcyjnego znaną jako **reguła Lenza** następująco: **Kierunek prądu indukcyjnego jest taki, że jego własne pole przeszkadza zmianom pola, które prąd ten wywołują.** Regułę dobrze ilustruje rysunek trzeci.



Rys.3.

Jeżeli mamy do czynienia z prostoliniowym przewodem o długości l , poruszającym się z prędkością v oraz gdy indukcja B , przewódnik l i prędkość v są do siebie prostopadłe, to siłę elektromotoryczną indukcji możemy również policzyć z zależności

$$\varepsilon_i = Blv. \quad (13)$$

Korzystając ze wzoru 4) oraz 7) otrzymamy

$$\oint_{\Gamma} E dl = -d\Phi / dt. \quad (14)$$

Jest to uogólnienie prawa indukcji i określa związek między zmiennym polem magnetycznym o indukcji \mathbf{B} oraz zmiennym polem elektrycznym o natężeniu \mathbf{E} .

Wokół każdego przewodnika, w którym płynie prąd o natężeniu I wytwarza się pole magnetyczne o indukcji \mathbf{B} . Wartość indukcji, zgodnie z **prawem Biote'a Savarte'a**, jest proporcjonalna do natężenia płynącego prądu

$$B \sim I. \quad (15)$$

Elektryczność

Każdy obwód, w którym płynie prąd elektryczny znajduje się wewnątrz strumienia indukcji magnetycznej wytworzonego przez prąd płynący we własnym obwodzie. Z proporcjonalności 15) wynika proporcjonalność strumienia indukcji magnetycznej do natężenia I

$$\Phi \sim I.$$

Zapisując w postaci równania otrzymamy

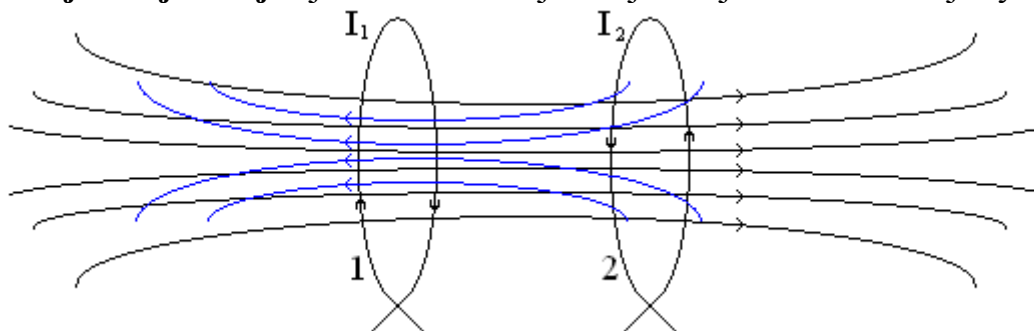
$$\Phi = L I, \quad (16)$$

gdzie L jest współczynnikiem proporcjonalności zwanym **indukcyjnością**. Jest to wielkość fizyczna zależna od cech geometrycznych obwodu i środowiska, w którym obwód się znajduje. Jeżeli w obwodzie płynie prąd zmienny $I = f(t)$, wówczas strumień indukcji magnetycznej obejmujący obwód też jest zmienny $\Phi = f'(t)$. W obwodzie pojawia się **siła elektromotoryczna indukcji własnej** ε_L , przy czym

$$\varepsilon_L = -dI / dt. \quad (17)$$

Zgodnie z regułą Lenza siła elektromotoryczna samoindukcji 17) przeciwdziała zmianom prądu, które ją wywołują.

Jeżeli prąd zmienny płynie w pierwszym obwodzie, to strumień indukcji tego prądu przenikający drugi obwód, wzbudza w nim **siłę elektromotoryczną indukcji wzajemnej**. Zjawisko indukcji wzajemnej dobrze ilustruje rysunek 4.



Rys.4.

Niech w obwodzie 1 płynie prąd zmienny o natężeniu I_1 , wówczas strumień indukcji magnetycznej obejmowanej przez obwód 2 wyniesie Φ_{21} . Ponieważ strumień zmienia się w czasie, to w obwodzie 2 zaindukuje się siła elektromotoryczna

$$\varepsilon_2 = -d\Phi_{21} / dt.$$

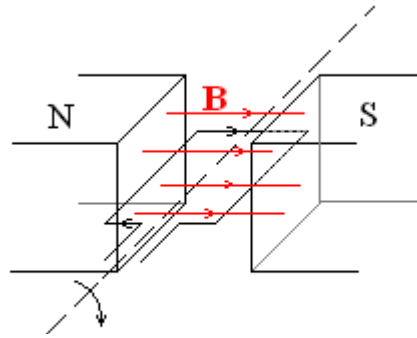
Strumień obejmowany przez obwód 2 jest proporcjonalny do natężenia prądu I_1 płynącego w obwodzie 1. Zatem

$$\Phi_{21} = M_{21} I_1 \text{ i } \varepsilon_2 = -M_{21} dI_1 / dt. \quad (18)$$

Z kolei prąd zmienny o natężeniu I_2 płynący w obwodzie 2 wzbudza siłę elektromotoryczną indukcji wzajemnej w obwodzie 1, przy czym

$$\Phi_{12} = M_{12} I_2 \text{ oraz } \varepsilon_1 = -M_{12} dI_2 / dt. \quad (19)$$

Współczynniki indukcyjności wzajemnej są sobie równe $M_{12} = M_{21}$. Zależą od geometrii obwodów elektrycznych i środowiska, i są dość trudne do obliczenia. Zarówno indukcyjność, jak i indukcyjność wzajemną mierzymy w henrach.



Rys.5.

Rozważmy układ przedstawiony na rysunku 5. Między biegunami magnesu umieszczono ramkę z drutu obracającą się ze stałą prędkością kątową ω . Strumień indukcji magnetycznej przenikający przez ramkę zmienia się zgodnie z równaniem

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t ,$$

gdzie: $\Phi_0 = B a b$, a a i b są wymiarami ramki. Podstawiając do 10) i 11) oraz wykonując odpowiednie działania otrzymamy wzór na natężenie prądu indukowanego w ramce w postaci:

$$I = I_0 \sin \omega t , \quad (20)$$

gdzie: $I_0 = Bab\omega/R$, przy czym $\omega = 2\pi/T$ lub $\omega = 2\pi\nu$ (T - okres obrotu, ν - częstotliwość). Siła elektromotoryczna zaindukowana w ramce

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t , \quad (21)$$

gdzie: $\varepsilon_0 = abB\omega$. Zauważmy, że natężenie prądu i napięcie są w fazach zgodnych. Milcząco założyliśmy, że w obwodzie występuje tylko opór omowy R . Sytuacja zmienia się radykalnie, gdy w obwodzie pojawi się indukcyjność L , pojemność C lub jedno i drugie. Jeżeli $L \neq 0$, wówczas w obwodzie indukuje się jeszcze siła elektromotoryczna samoindukcji i $\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_L = RI$. Uwzględniając równania 17) i 21) oraz porządkując względem natężenia prądu otrzymamy równanie różniczkowe w postaci:

$$LdI/dt + RI = U_0 \sin \omega t . \quad (22)$$

Łatwo zauważyć, że rozwiązaniem tego równania jest funkcja

$$I = I_0 \sin(\omega t - \phi) . \quad (23)$$

Porównując 21) i 23) widzimy, że w obwodzie zawierającym indukcyjność, natężenie prądu opóźnia się względem siły elektromotorycznej (i napięcia U). Podstawiając 23) do 22) znajdziemy wartości stałych: amplitudę I_0 i przesunięcie fazowe ϕ . Po prostych przekształceniach otrzymamy:

$$\operatorname{tg} \phi = L\omega/R \text{ oraz } I_0 = U_0 / (R^2 + \omega^2 L^2)^{0,5} ,$$

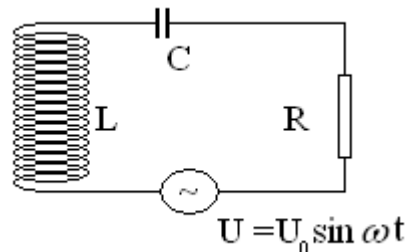
gdzie: $Z^2 = R^2 + \omega^2 L^2 \quad (24)$

jest kwadratem zawady. Opór bierny obliczymy ze wzoru

$$R_L = \omega L .$$

Elektryczność

Weźmy po uwagę taki obwód, jak na rysunku 6, zawierający indukcyjność L , pojemność C oraz opór omowy R . Włączmy zasilanie prądem przemiennym o napięciu $U = U_0 \sin \omega t$.



Rys.6.

W obwodzie mamy trzy źródła siły elektromotorycznej: zasilanie, cewkę i kondensator. Ponieważ płynie prąd przemienny, to w cewce wzbudza się siła elektromotoryczna samoindukcji, a kondensator ładuje się do napięcia U' i rozładowuje. Na podstawie prawa Kirchhoffa możemy sformułować równanie:

$$U + U' + \varepsilon_L = RI,$$

ale $U' = -Q/C$, gdzie Q jest ładunkiem elektrycznym zgromadzonym na okładkach kondensatora, a ε_L dane jest wzorem 17). Więc

$$U = Q/C + LdI/dt + RI = U_0 \sin \omega t$$

Zróżniczkujemy obie strony równania względem czasu, wówczas

$$1/CdQ/dt + Ld^2I/dt^2 + RdI/dt = U_0\omega \cos \omega t,$$

Zauważmy, że $I = dQ/dt$, i uporządkujemy równanie względem rzędów pochodnych, wtedy

$$d^2I/dt^2 + (R/L)dI/dt + [1/(LC)]I = (U_0\omega/L)\cos \omega t. \quad 25)$$

Otrzymaliśmy równanie różniczkowe drugiego rzędu, niejednorodne, o współczynnikach całkowitych. Całkę szczególną równania 25) wybieramy w postaci:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \phi), \quad 26)$$

gdzie: I_0 i ϕ są to stałe, które wyznaczymy z układu równań algebraicznych po podstawieniu 26) do 25). Wykonując proste rachunki otrzymamy:

$$\operatorname{tg} \phi = \{\omega L - [1/(\omega C)]\} / R \quad 27)$$

oraz

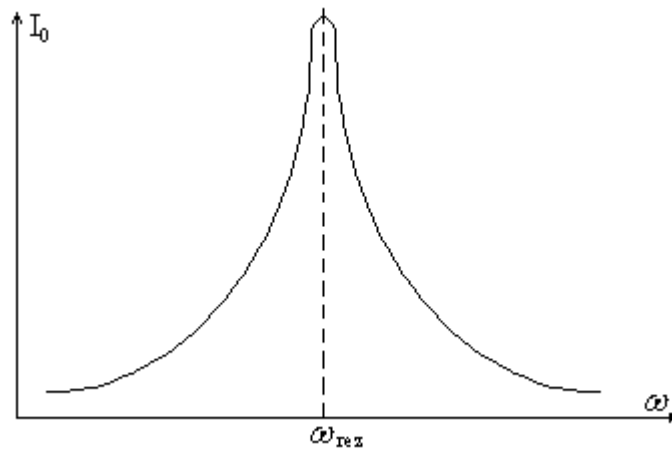
$$I_0 = U_0 / \{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2\}^{1/2}. \quad 28)$$

Łatwo zauważyć, że $I_0 = f'(\omega)$ i jest funkcją częstości kołowej. I_0 osiąga maksimum, gdy mianownik w 28) minimum. Zbadajmy zatem ekstremum funkcji

$$f(\omega) = R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2.$$

Warunkiem koniecznym istnienia ekstremum jest zerowanie się pierwszej pochodnej.

Elektryczność



Rys.7.

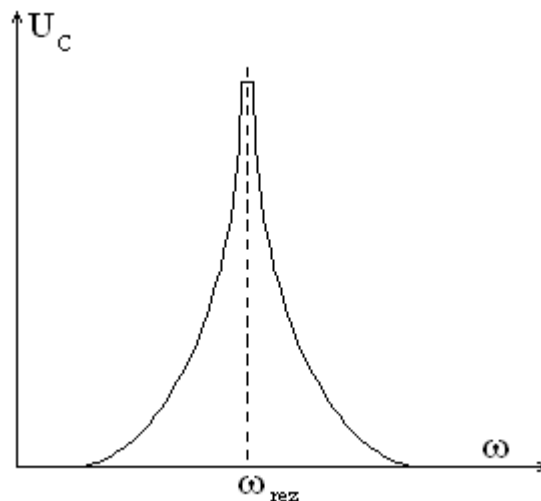
$$df/d\omega = 2[\omega L - 1/(\omega C)][L + 1/(\omega^2 C)] = 0,$$

stąd $\omega_{\text{rez}} = 1/\sqrt{LC}$, 29)

dla tej wartości funkcja $f(\omega)$ osiąga minimum, a $I_0 = U_0/R$ maksimum. Zjawisko to znane jest jako **rezonans szeregowy**. Amplitudy napięć na cewce U_L i kondensatorze U_C osiągają wartości maksymalne. Napięcia są w fazach przeciwnych, a ich suma jest równa spadkowi napięcia na oporze omowym U_R tak, że

$$U_R = |U_L - U_C|.$$

Wykres funkcji 28) przedstawiliśmy na rysunku 7. Zmiany napięcia na okładkach kondensatora dobrze pokazuje wykres na rysunku 8.



Rys.8.

Moc chwilową wydzieloną w czasie jednego okresu T w danym elemencie obwodu obliczymy z zależności

$$P = T^{-1} \int_0^T U(t)I(t)dt = T^{-1} \int_0^T U_0 I_0 \sin(\omega t) \sin(\omega t - \phi) dt = 1/2 I_0 U_0 \cos \phi. \quad 30)$$

Otrzymaliśmy tak zwaną **moc czynną**. I_0 i U_0 są to szczytowe wartości natężenia i napięcia prądu przemiennego (sinusoidalnego). Porównując skutki

Elektryczność

energetyczne wywoływane przez prąd przemienny i prąd stały możemy wprowadzić pojęcie wartości skutecznych natężenia, i napięcia. Otóż, jeżeli zastąpimy źródło prądu przemiennego, źródłem prądu stałego dającego takie natężenie i napięcie, że skutki energetyczne będą identyczne, to wielkości te określamy jako **natężenie i napięcie skuteczne**. Innymi słowy są to takie wartości napięcia i natężenia prądu stałego, które wywołują takie same skutki energetyczne jak napięcie i natężenie prądu przemiennego. Zatem

$$1/2 I_0 U_0 \cos \phi = I_{sk} U_{sk} \cos \phi .$$

Stąd łatwo zauważyć, że

$$I_{sk} = I_0 / \sqrt{2} \text{ i } U_{sk} = U_0 / \sqrt{2} . \quad (31)$$

A więc moc czynna może być obliczona ze wzoru:

$$P = I_{sk} U_{sk} \cos \phi , \quad (32)$$

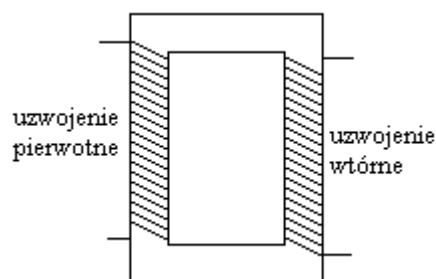
gdzie

$$P_p = I_{sk} U_{sk} = 1/2 I_0 U_0 \quad (33)$$

nosi nazwę **mocy pozornej**. **Mocą bierną** nazywamy wielkość wyrażającą się zależnością:

$$P_b = I_{sk} U_{sk} \sin \phi . \quad (34)$$

Zjawisko indukcji wzajemnej znalazło zastosowanie przy budowie bardzo użytecznego urządzenia, jakim jest **transformator**. Transformator składa się z rdzenia dobrze indukującego pole magnetyczne (zazwyczaj zbudowanego z cienkich blach ze stali transformatorowej) oraz uzwojenia pierwotnego i wtórnego nawiniętych na rdzeń.



Rys.9.

Przez uzwojenie pierwotne przepuszczamy prąd przemienny. W rdzeniu pojawia się zmienny strumień indukcji magnetycznej. Przenika również do wnętrza uzwojenia wtórnego wzbudzając w nim siłę elektromotoryczną indukcji o tej samej częstotliwości, co zasilający uzwojenie pierwotne prąd przemienny. Wartość siły elektromotorycznej jest proporcjonalna do liczby zwojów uzwojenia wtórnego. Całkowita siła elektromotoryczna zaindukowana w uzwojeniu wtórnym jest sumą wszystkich sił elektromotorycznych powstałych w każdym zwoju. Jeżeli liczba zwojów uzwojenia wtórnego jest większa niż uzwojenia pierwotnego, wówczas uzyskamy podwyższenie napięcia, jeżeli mniejsza, to obniżenie. Zakładając, że przesunięcia fazowe w obu uzwojeniach są takie same i nie ma strat energii na rozpraszanie strumienia i energię wewnętrzną, wówczas możemy przyjąć, że moc wydzielona w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym jest taka sama czyli

Elektryczność

a stąd

ponieważ

to

$$\begin{aligned} I_{psk}U_{psk} &= I_{wsk}U_{wsk}, \\ U_{wsk}/U_{psk} &= I_{psk}/I_{wsk}, \\ U_{wsk} \sim n_w, \text{ a } U_{psk} &\sim n_p, \\ U_{wsk}/U_{psk} &= n_w/n_p. \end{aligned} \quad 35)$$

nazywamy **przekładnią transformatora**. Stosunek rzeczywistej mocy wydzielonej w uzwojeniu wtórnym do rzeczywistej mocy wydzielonej w uzwojeniu pierwotnym nazywamy **wydajnością transformatora**. Straty mocy powstają wskutek wydzielania się ciepła Joule'a w obydwu uzwojeniach transformatora, wydzielania się energii wewnętrznej w rdzeniu spowodowane **histerezą** żelaza oraz wydzielania się energii wewnętrznej w rdzeniu wskutek przepływu prądów wirowych. Gdy obwód wtórny jest otwarty - transformator jest na biegu jałowym, wówczas straty spowodowane ciepłem Joule'a są znikome, pozostałych przyczyn usunąć się nie da. Różnica faz jest zbliżona do 90° . Zmniejsza się znacznie przy obciążeniu uzwojenia wtórnego.

Wyznaczanie indukcyjności solenoidu

Zawada obwodu zasilanego prądem przemiennym wyraża się wzorem (24). Po prostych przekształceniach otrzymamy

$$L = (1/\omega) (Z^2 - R^2)^{1/2}, \quad (36)$$

gdzie $\omega = 2\pi\nu$, a opór R i zawadę Z wyznaczymy z prawa Ohma dla odcinka obwodu, przy czym

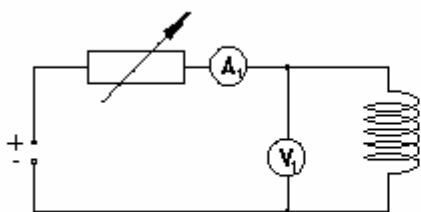
$$R = U/I, \quad \text{a} \quad Z = U_{sk}/I_{sk}. \quad (37)$$

Zatem wzór (36) da się przedstawić w postaci

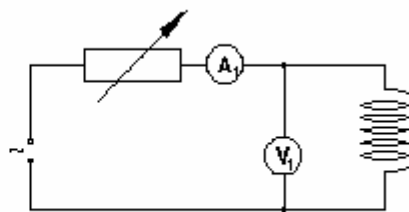
$$L = [1/(2\pi\nu)] \{ (U_{sk}/I_{sk})^2 - (U/I)^2 \}^{1/2}. \quad (38)$$

Wykonanie ćwiczenia

1. Montujemy obwód, jak na rysunku 10. Źródłem prądu stałego jest zasilacz



Rys. 10.



Rys. 11.

stabilizowany. Przed zamknięciem obwodu należy zwrócić się do prowadzącego zajęcia o sprawdzenie połączeń.

2. Zmieniając ustawienia suwaka opornicy suwakowej, wykonujemy dziesięć pomiarów napięcia i natężenia prądu płynącego przez solenoid bez rdzenia.

3. Czynności z punktu 2 powtarzamy, wkładając do wnętrza cewki rdzenie wskazane przez prowadzącego.

4. Źródło stałej siły elektromotorycznej zastępujemy źródłem prądu przemiennego (patrz schemat na rysunku 11).

5. Zmieniając ustawienia suwaka opornicy suwakowej, wykonujemy dziesięć pomiarów napięcia i natężenia skutecznego prądu, płynącego przez solenoid bez rdzenia.

6. Czynności z punktu 5 powtarzamy dla cewki z rdzeniami używanymi do pomiarów w punkcie 3.

7. Korzystając ze wzorów (37) obliczamy opór omowy dla każdego pomiaru oddzielnie, a następnie wyznaczamy wartość średnią oporu ze wszystkich pomiarów.

Elektryczność

8. Podobnie obliczamy zawadę. Wartość średnią zawady wyznaczamy oddzielnie dla każdego rdzenia.

9. Indukcyjność obliczamy ze wzoru 36).

Znając indukcyjność oraz opór omowy możemy wyznaczyć przesunięcie fazowe ϕ ponieważ

$$\operatorname{tg} \phi = 2 \pi \nu L / R. \quad 39)$$

10. Korzystając ze wzoru 39) wyznaczamy przesunięcie fazowe dla każdego rdzenia oddzielnie.

11. Błąd pomiaru napięcia i natężenia liczymy jako błąd średni kwadratowy i porównujemy z błędem wynikającym z klasy i zakresu użytych przyrządów pomiarowych. Błąd popełniony przy wyznaczaniu indukcyjności i przesunięcia fazowego obliczamy, jak dla wielkości złożonych.

12. Prowadzimy dyskusję wyników i błędów pomiarowych, zwracając uwagę i odpowiednio dyskutując wpływ oporności wewnętrznych przyrządów pomiarowych na otrzymane wyniki.

Elektryczność

Literatura:

1. Kuczera, red. Laboratorium z fizyki i biofizyki.
2. Fulińska, red. Opisy i instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych z fizyki, II.
3. T. Dryński, red. Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki.
4. Z. Zawisławski Metody opracowywania danych doświadczalnych.
5. B. Jaworski i inni Kurs fizyki, t.2.
6. A. Januszajtis. Fizyka dla politechnik, t.2.