

## Ćwiczenie 85

**INDUKCJA ELEKROMAGNETYCZNA**  
*Badanie rezonansu szeregowego*

**I. Wstęp**

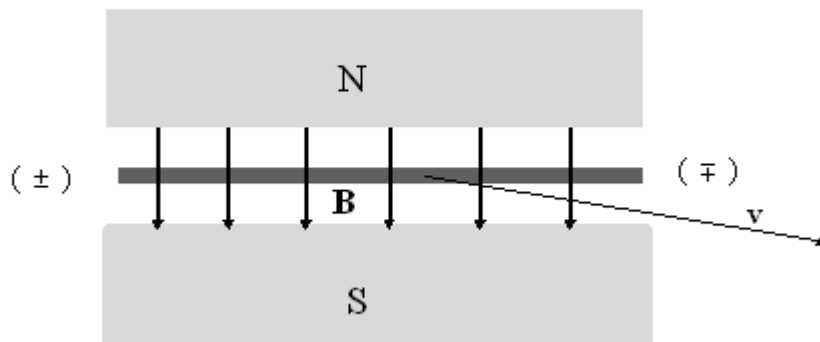
Niech w jednorodnym polu magnetycznym o **indukcji  $\mathbf{B}$** , patrz rys. 1, porusza się z prędkością  $\mathbf{v}$  przewodnik. Pod wpływem **siły Lorentza**

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

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

$$eE = e\mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

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  $\varepsilon$  **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:

$$B = B_x i + B_y j + B_z k \quad 6a)$$

$$dl = dl_x i + dl_y j + dl_z k \quad 6b)$$

$$dr/dt = dx/dt i + dy/dt j + dz/dt k \quad 6c)$$

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 założymy, że funkcje 6a), 6b) oraz promień wodzący 6c) są jednostajnie ciągłe, wówczas możemy zamienić kolejność operacji całkowania i różniczkowania. Wtedy

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

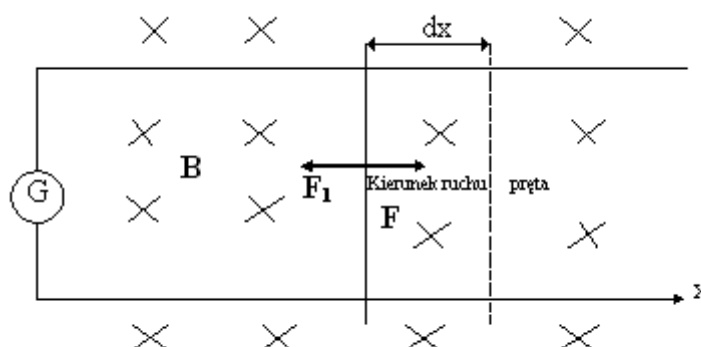
gdzie:  $dl \times r = dS$  jest elementem powierzchniowym powierzchni  $S$  rozpiętej na krzywej zamkniętej  $\Gamma$ . Ponieważ

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

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. Zmienił się strumień indukcji magnetycznej, ponieważ zmieniła się powierzchnia obejmowana przez obwód i w obwodzie pojawiła się siła

Elektryczność

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  $F_l$ . Aby przesunąć pręcik o odcinek  $dx$  należy przeciwko tej sile wykonać pracę

$$dW = -Fdx,$$

bo  $F = -F_l$ , przy czym

$$F_l = BIl,$$

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:  $\varepsilon_i$  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

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

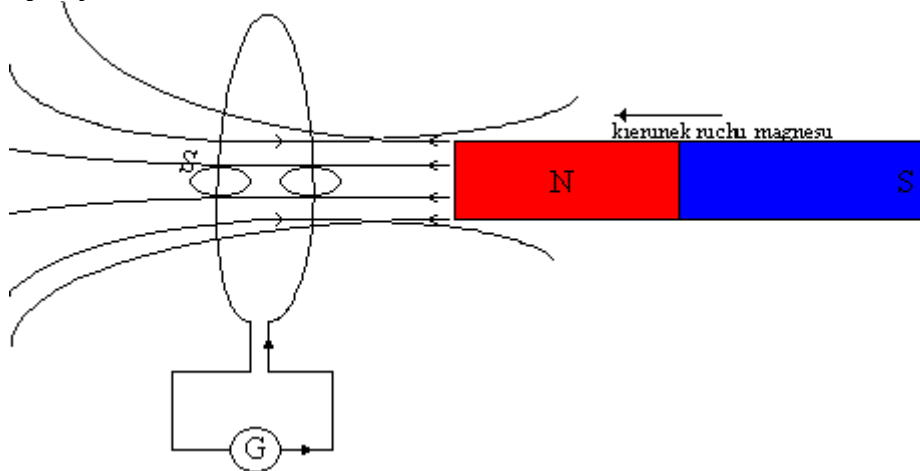
gdzie:  $R$  jest **oporem elektrycznym** obwodu.

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

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

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  $B$ , przewód  $l$  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

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

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

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

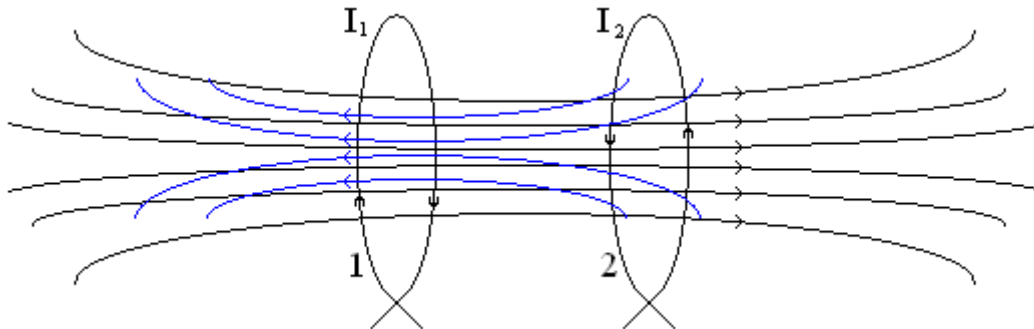
Elektryczność

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**  $\varepsilon_L$ , 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  $\Phi_{21}$ . Ponieważ strumień zmienia się w czasie, to w obwodzie 2 zaindukuje się siła elektromotoryczna

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

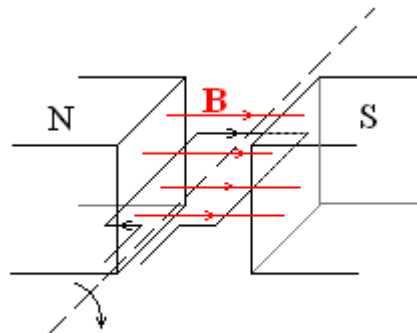
Strumień obejmowany przez obwód 2 jest proporcjonalny do natężenia prądu  $I_1$  płynącego w obwodzie 1. Zatem

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

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  $\omega$ . 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,  $\nu$  - 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  $\phi$ . Po prostych przekształceniach otrzymamy:

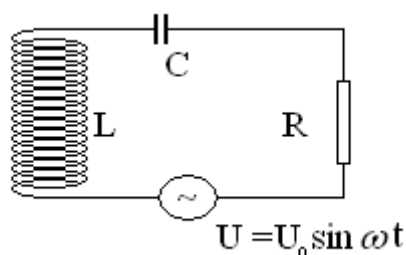
$$\operatorname{tg} \phi = L\omega/R \quad \text{oraz} \quad I_0 = U_0 / (R^2 + \omega^2 L^2)^{0,5},$$

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

jest kwadratem zawady. Opór bierny obliczymy ze wzoru

$$R_L = \omega L.$$

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  $\varepsilon_L$  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  $\phi$  są to stałe, które wyznaczymy z układu równań algebraicznych po podstawieniu 26) do 25). Wykonując proste rachunki otrzymamy:

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

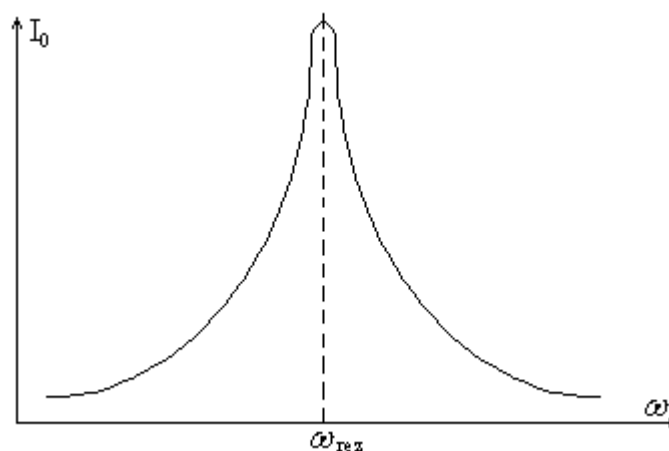
oraz

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

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.



Rys.7.

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

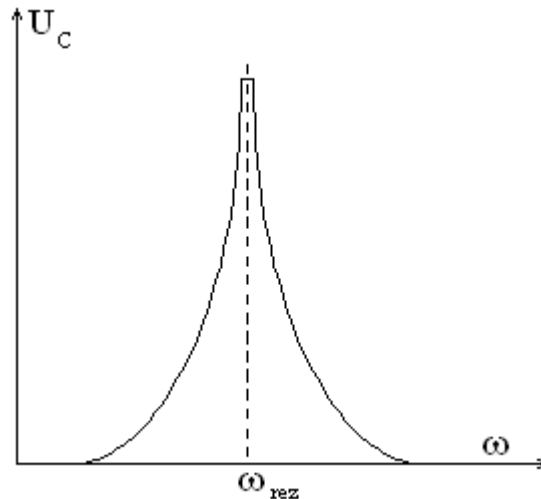
stąd

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

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 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

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

A więc moc czynna może być obliczona ze wzoru:

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

gdzie

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

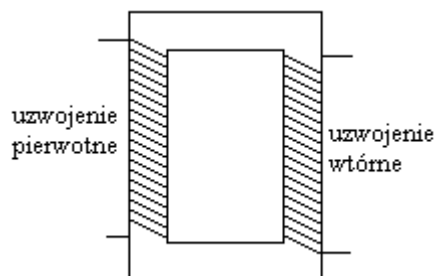
nosi nazwę **mocy pozornej**. **Mocą bierną** nazywamy wielkość wyrażającą się zależnością:



$$P_b = I_{sk} U_{sk} \sin \phi.$$

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

a stąd

ponieważ

to

$$I_{psk} U_{psk} = I_{wsk} U_{wsk},$$

$$U_{wsk}/U_{psk} = I_{psk}/I_{wsk},$$

$$U_{wsk} \sim n_w, \text{ a } U_{psk} \sim n_p,$$

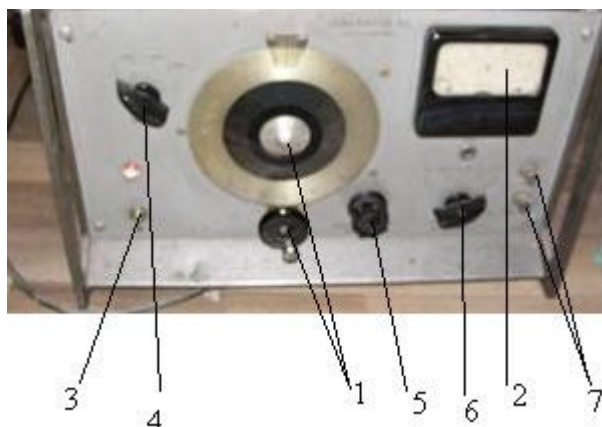
$$U_{wsk}/U_{psk} = n_w/n_p.$$

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  $90^\circ$ . Zmniejsza się znacznie przy obciążeniu uzwojenia wtórnego.

## Badanie rezonansu szeregowego

Źródłem prądu przemiennego jest generator drgań akustycznych pozwalający na zmianę w szerokim zakresie częstotliwości prądu zasilania. Obraz płyty czołowej generatora przedstawiono na rysunku 10.



1. Ciągła regulacja częstotliwości,
2. woltomierz,
3. włącznik,
4. skokowa zmiana częstotliwości,
5. ciągła regulacja napięcia,
6. skokowa regulacja napięcia
7. zaciski wyjściowe.

Rys.10.

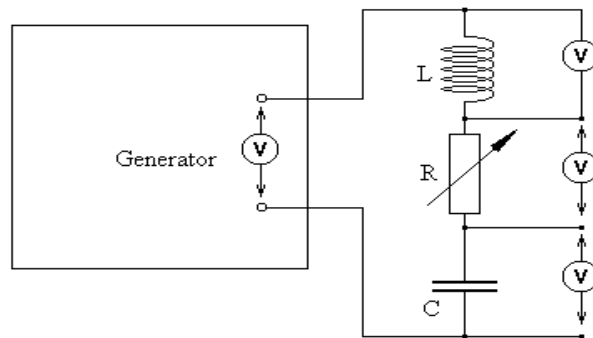
Okazuje się, że wartość napięcia:  $U_L$  na zaciskach cewki o indukcyjności  $L$ ,  $U_C$  na okładkach kondensatora o pojemności  $C$  i  $U_R$  na oporniku  $R$ , silnie zależy o częstotliwości  $\nu$  prądu zasilającego. Krzywa zależności napięcia od częstotliwości

$$U_L = f'(\nu) \quad \text{lub} \quad U_C = f''(\nu),$$

tposiada pik odpowiadający częstotliwości rezonansowej. Z rozważań przedstawionych we wstępie i ze wzoru 29) wynika, że

$$\nu_{\text{rez}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad 40)$$

1. Montujemy obwód, jak na schemacie przedstawionym na rysunku 11.



Rys.11.

2. Ustawiamy wartości oporu  $R$ , indukcji  $L$ , pojemności  $C$  wskazane przez prowadzącego zajęcia.
3. Zmieniamy pokrętkiem (1) lub (4) i (1) wartości częstotliwości jednocześnie odczytując napięcie  $U_1$  na wyjściu generatora i  $U_2$  na cewce. W pobliżu częstotliwości rezonansowej zagęszczamy pomiary. Skok częstotliwości wskazuje prowadzący zajęcia. **Uwaga! Podczas całej serii pomiarów należy utrzymać stałe napięcie wyjściowe, w razie potrzeby regulujemy jego wartość pokrętkiem (5) potencjometru umieszczonego na płycie czołowej generatora.**
4. Mierzymy wartości napięcia na oporze  $R$  i na kondensatorze  $C$  dla częstotliwości rezonansowej.
5. Powtarzamy pomiary z punktu 3 i 4, dla tych samych częstotliwości. Obliczamy średnią wartość napięcia  $U_L$ .
6. Przenosimy woltomierz na zaciski kondensatora i powtarzamy pomiary z punktów 3, 4, 5. Obliczamy średnią wartość napięcia  $U_C$ .
7. Sporządzamy wykres zależności  $U_L = f_1(\nu)$  oraz  $U_C = f_2(\nu)$  i z wykresów wyznaczamy wartość rezonansową częstotliwości.
8. Na wykresy nanosimy oszacowane wartości błędów pomiaru częstotliwości i napięcia przynajmniej w pięciu punktach.
9. Korzystając ze wzoru 40) obliczamy częstotliwość rezonansową.
10. Sporządzamy wykres wskazowy z wartości  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  dla częstotliwości rezonansowej.
11. Korzystając ze wzorów

$$R_L = 2\pi\nu L \quad \text{i} \quad R_C = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

12. Obliczamy opory bierne  $R_L$  i  $R_C$  dla częstotliwości rezonansowej.
13. Przeprowadzamy rachunek błędów, analizę pomiarów i wyników oraz formułujemy wnioski.

**Uwaga!** Klasa kondensatora dekadowego wynosi 0,5 dla każdej dekady i klasa indukcyjności dekadowej 0,5 dla każdej dekady.

**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.