

INDUKCJA ELEKTROMAGNETYCZNA

Charakterystyka żarówki

I. Wstęp

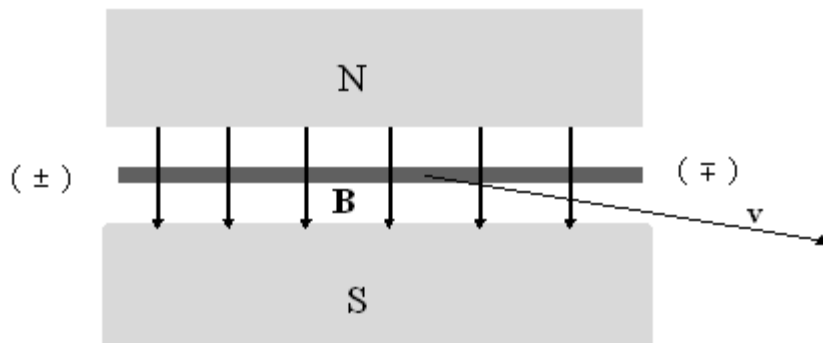
Niech w jednorodnym polu magnetycznym o **indukcji \mathbf{B}** , patrz rys. 1, porusza się z prędkością \mathbf{v} przewodnik. Pod wpływem **siły Lorentza**

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

gdzie $\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$ i $\mathbf{F} \perp \mathbf{B}$, elektrony (o ładunku e) płyną wzdłuż przewodnika, wtedy jeden jego koniec łąduje 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**

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

pochozącą 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

$$U = \int_r \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\varepsilon, \quad 4)$$

gdzie: $d\mathbf{l}$ jest elementem przewodnika, a ε **siłą elektromotoryczną**.

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

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

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

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

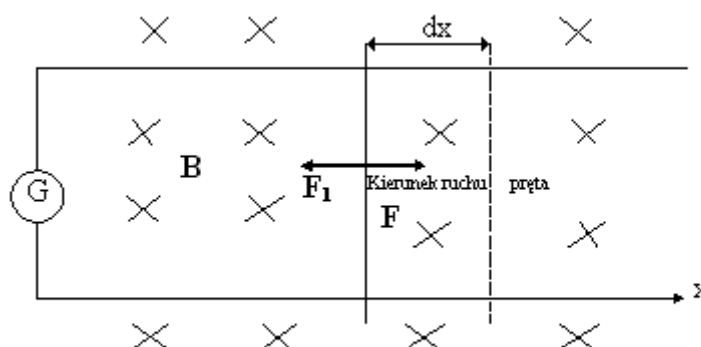
gdzie: $dl \times r = dS$ jest elementem powierzchniowym powierzchni S rozpiętej na krzywej zamkniętej Γ . Ponieważ

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

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

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

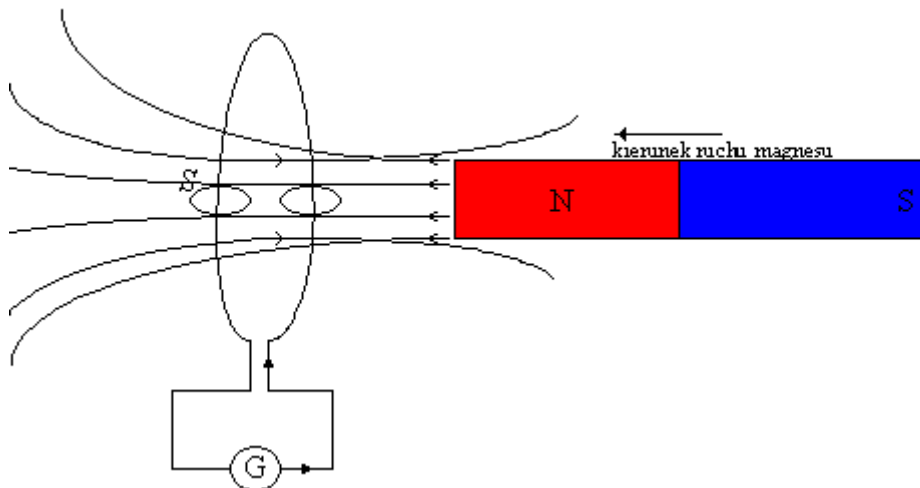
gdzie: R jest **oporem elektrycznym** obwodu.

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 , 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 B oraz zmiennym polem elektrycznym o natężeniu E .

Wokół każdego przewodnika, w którym płynie prąd o natężeniu I wytwarza się pole magnetyczne o indukcji 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

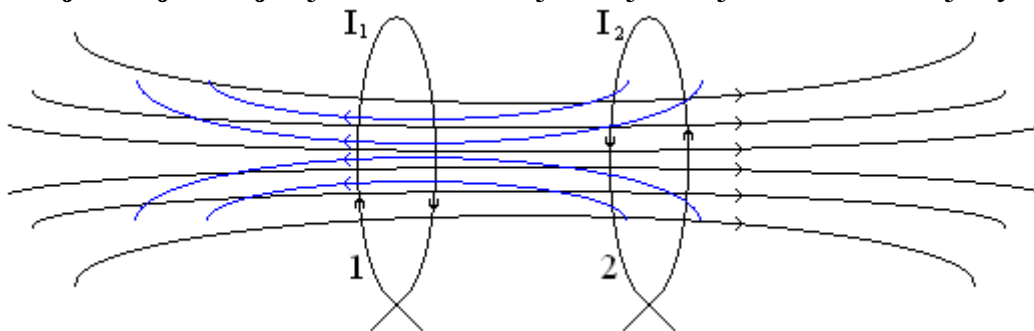
$$\Phi = L I, \quad (16)$$

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

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

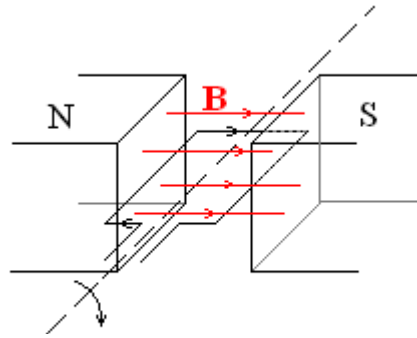
Strumień obejmowany przez obwód 2 jest proporcjonalny do natężenia prądu I_1 płynącego w obwodzie 1. Zatem

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

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:

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

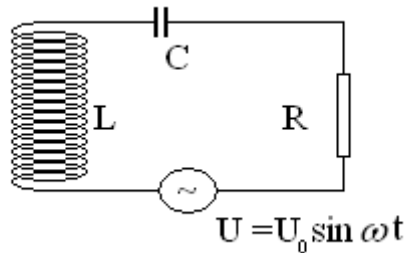
gdzie: $Z^2 = R^2 + \omega^2 L^2 \quad (24)$

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

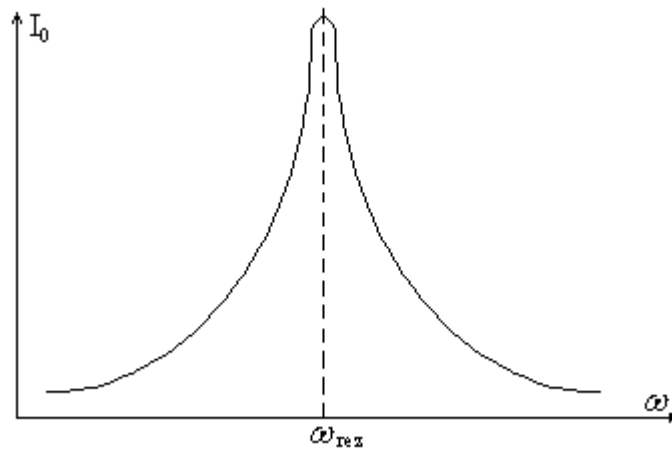
$$I_0 = U_0 / \{ R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2 \}^{1/2}. \quad 28)$$

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.

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

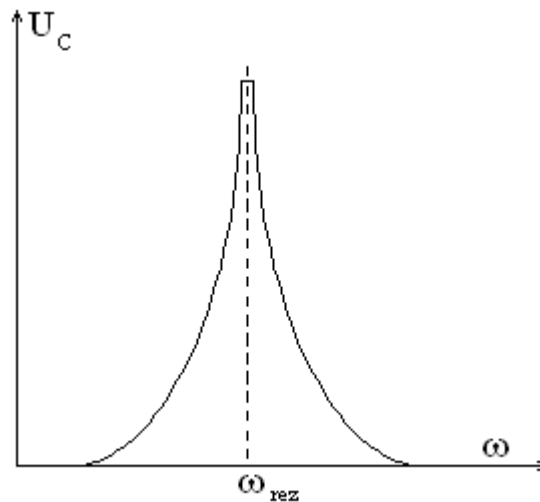
stąd

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

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

Elektryczność

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:

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

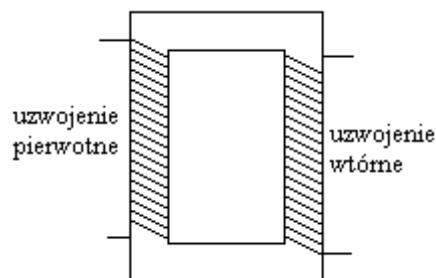
gdzie

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

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

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

a stąd

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

Elektryczność

ponieważ

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

to

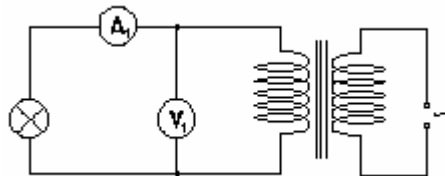
$$U_{wsk}/U_{psk} = n_w/n_p. \quad 35)$$

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.

Charakterystyka żarówki

Charakterystyką prądowo-napięciową nazywamy funkcję $I = f(U)$. Jeżeli temperatura jest stała, to zgodnie z prawem Ohma dla odcinka obwodu, natężenie jest proporcjonalne do przyłożonego napięcia. W tym ćwiczeniu studenci wyznaczają charakterystykę



Rys.10.

prądowo-napięciową żarówki oraz badają zależność oporności $R = f(U)$ i wydzielonej mocy od przyłożonego napięcia $P = f(U)$. Wiadomo, że dla przewodników metalicznych, w przybliżeniu opór jest funkcją liniową temperatury.

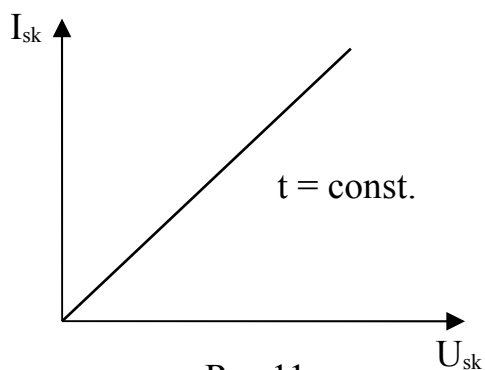
$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

gdzie: R_t - opór przewodnika w temperaturze t ,

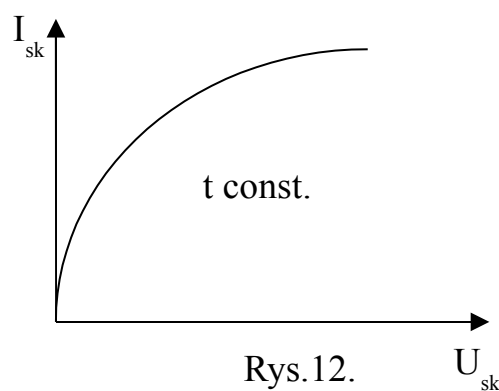
R_0 - opór w temperaturze 0°C ,

α - współczynnik temperaturowy oporu

oraz t - temperatura przewodnika mierzona w stopniach Celsjusza.



Rys.11.



Rys.12.

1. Montujemy obwód, jak na rysunku 10. Po sprawdzeniu przez prowadzącego zajęcia włączamy go do sieci ustawiając pokrętkę autotransformatora w pozycji zero.
2. Zmieniamy pokrętką autotransformatora napięcie co 10V do osiągnięcia wartości maksymalnej. Dla każdej wartości napięcia odczytujemy natężenie.
3. Pomiar z punktu 2 powtarzamy zmniejszając napięcie od największego do zera.
4. Czynności z punktu 2 i 3 powtarzamy trzykrotnie.
5. Dla każdego napięcia obliczamy średnią wartość natężenia skutecznego.
6. Pomiar z punktów 2 - 5 powtarzamy dla drugiej żarówki.
7. Obliczamy opór elektryczny korzystając ze wzoru
$$R = U_{sk} / \langle I_{sk} \rangle,$$
gdzie $\langle I_{sk} \rangle$ jest wartością średnią natężenia skutecznego.
8. Obliczamy moc ze wzoru 32). Z uwagi na małą pojemność i indukcyjność włókna żarówki przyjmujemy, że przesunięcie fazowe jest równe zero.
9. Oceniamy błędy odczytu napięcia i natężenia z klasy przyrządów i zakresu mierników. Błędy popełnione przy obliczaniu oporu i mocy liczymy tak, jak dla wielkości złożonej.
10. Sporządzamy na papierze milimetrowym (lub na komputerze) wykresy $\langle I_{sk} \rangle = f(U_{sk})$; $R = f'(U_{sk})$ i $P = f''(U_{sk})$ oraz graficznie oznaczamy błąd, przynajmniej w czterech punktach.
11. Przeprowadzamy dyskusję wyników i błędów. Należy zwrócić uwagę na zależność oporu włókna metalicznego od temperatury, straty mocy na promieniowanie i ogrzewanie.

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.