

4. MATERIAŁ NAUCZANIA

4.1. Pole elektryczne i kondensatory

4.1.1. Materiał nauczania

Zgodnie z prawem ustalonym przez Coulomba siła F , z jaką na każdy z dwóch ładunków punktowych Q_1 i Q_2 działa ich wspólne pole elektryczne, jest proporcjonalna do iloczynu tych ładunków i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości r między nimi.

Przenikalność elektryczna bezwzględna

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

gdzie: $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$ – stała elektryczna zwana też przenikalnością elektryczną próżni

ε_r – przenikalność elektryczna względna środowiska.

Przenikalność elektryczna próżni ε_0 jest jedną ze stałych fizycznych, a jej wartość została określona w układzie SI i ma wymiar farada na metr.

Przenikalność elektryczna względna podaje nam, ile razy przenikalność określonego środowiska jest większa od przenikalności próżni.

Przenikalność względna jest wielkością bezwymiarową.

Natężenie pola elektrycznego

Zgodnie z prawem Coulomba na ładunek próbny q działa siła F .

Siła F , określona wzorem, jest proporcjonalna do wartości ładunku „próbnego”.

Natężenie pola elektrycznego w dowolnym punkcie, w którym istnieje pole elektryczne, jest wielkością wektorową, w której wartość mierzymy stosunkiem siły działającej na umieszczony w tym punkcie ładunek „próbnny” do wartości tego ładunku.

$$E = \frac{F}{q} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r^2}$$

Równanie jednostek można napisać umownie w postaci

$$[E] = \frac{[F]}{[q]} = \frac{N}{C} = \frac{N \cdot m}{C \cdot m} = \frac{J}{C \cdot m} = \frac{W \cdot s}{A \cdot s \cdot m} = \frac{V}{m}$$

Jeżeli w każdym punkcie pola elektrycznego wektor natężenia pola E ma ten sam zwrot i tę samą wartość (tę samą miarę), to pole takie nazywamy polem równomiernym.

Potencjał i napięcie elektryczne

Można wykazać, że praca wykonana wzdłuż dowolnej drogi zamkniętej przechodzącej przez punkty A i B jest zawsze równa zero. Jest to jedna z podstawowych własności pola elektrycznego.

Stosunek pracy ΔW , którą wykonałyby siły pola elektrycznego przy przemieszczeniu ładunku

„próbnego” dodatniego q z punktu A do punktu B, do wartości tego ładunku nazywamy napięciem elektrycznym między punktami $U_{AB} = \frac{\Delta W}{q}$.

Ponieważ praca wykonana przy przemieszczaniu ładunku $\Delta W = F\Delta l = E \cdot q \cdot \Delta l$

$$U_{AB} = U = E \cdot \Delta l$$

$$[E] = \frac{[U]}{[\Delta l]} = \frac{V}{m}$$

Potencjałem elektrycznym w punkcie A pola elektrycznego nazywamy stosunek pracy wykonanej przez przemieszczenie ładunku „próbnego” q z punktu A do punktu położonego w nieskończoności, do ładunku „próbnego” q , czyli

$$\varphi_A = \frac{\Delta W_{A \rightarrow \infty}}{q}$$

Analogicznie potencjał w punkcie B

$$\varphi_B = \frac{\Delta W_{B \rightarrow \infty}}{q}$$

$$\Delta W = \Delta W_{A \rightarrow \infty} - \Delta W_{B \rightarrow \infty} \quad \text{to} \quad U_{AB} = \frac{\Delta W}{q} = \frac{\Delta W_{A \rightarrow \infty}}{q} - \frac{\Delta W_{B \rightarrow \infty}}{q} = \varphi_A - \varphi_B$$

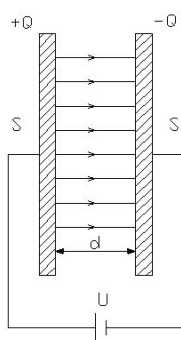
Jednostką potencjału, podobnie jak jednostką napięcia, jest 1 volt [1 V].

Miejsce geometryczne punktów o równym potencjale nazywamy powierzchnią równego potencjału lub powierzchnią ekwipotencjalną.

Powierzchnie ekwipotencjalne w polu ładunku punktowego tworzą koncentryczne powierzchnie kuliste.

Kondensatory

Kondensatorem nazywamy urządzenie składające się z dwóch przewodników zwanych okładzinami, rozdzielonych dielektrykiem. Pojemność kondensatora C jest cechą charakterystyczną (kondensatora) określającą jego zdolność do gromadzenia ładunku elektrycznego.



Rys. 1. Kondensator płaski (przekrój poprzeczny) [1, s. 94]

Pojemność kondensatora płaskiego można obliczyć ze wzoru: $C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d}$

gdzie: C – pojemność kondensatora w [F],
 S – powierzchnia okładziny w [m²],
 ε – przenikalność bezwzględna dielektryka $\left[\frac{F}{m} \right]$,
 d – odstęp między okładzinami w m.

Jednostką pojemności jest Farad [1F].

Mniejsze jednostki to:

	milifarad	$1 \text{ mF} = 10^{-3} \text{ F}$
	mikrofarad	$1 \mu \text{ F} = 10^{-6} \text{ F}$
	nanofarad	$1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$
	pikofarad	$1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$

Ładunek zgromadzony na jednej z okładzin nazywamy ładunkiem kondensatora.

Ładunek jest wprost proporcjonalny do napięcia, $Q = C \cdot U$, czyli pojemność kondensatora jest stosunkiem ładunku kondensatora do napięcia występującego pomiędzy jego okładzinami.

$$C = \frac{Q}{U}$$
$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{C}{V} = F$$

Pojemnością przewodnika odosobnionego nazywamy stosunek ładunku nagromadzonego na przewodniku do jego potencjału względem obranego punktu w polu elektrycznym, któremu przypisujemy potencjał równy zeru, czyli:

$$C = \frac{Q}{\varphi}$$

przy czym:

Q - ładunek zgromadzony na przewodniku

φ - potencjał tego ładunku

Rozróżniamy kondensatory :

a) płaskie

b) cylindryczne (walcowe)

Kondensator nazywamy płaskim, jeżeli jego okładzinami są płyty metalowe płaskie równoległe. Pojemność kondensatora płaskiego jest tym większa, im większa jest powierzchnia okładzin i przenikalność elektryczna względna dielektryka oraz im mniejszy odstęp między okładzinami.

Kondensator nazywamy cylindrycznym (walcowym), jeżeli jego okładziny zbudowane są z dwóch cylindrów koncentrycznych oddzielonych dielektrykiem.

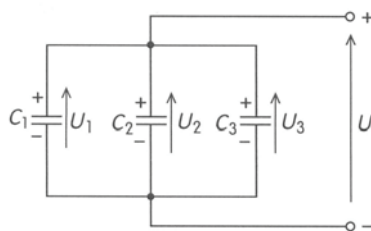
Pole elektryczne w kondensatorze cylindrycznym nie jest równomierne.

Łączenie kondensatorów

Rozróżniamy dwa rodzaje połączeń kondensatorów: połączenie szeregowe i połączenie równoległe.

Połączenie równoległe

Przy połączeniu równoległym kondensatorów napięcie na zaciskach każdego kondensatora jest takie samo.

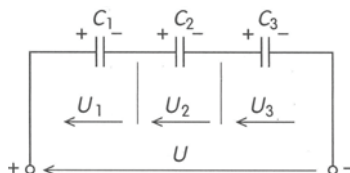


Rys. 2. Połączenie równoległe kondensatorów [3, s. 58]

Przy połączeniu równoległym kondensatorów pojemność zastępcza jest równa sumie pojemności poszczególnych kondensatorów.

$$C = C_z = C_1 + C_2 + C_3$$

Połączenie szeregowe



Rys. 3. Połączenie szeregowe kondensatorów [3, s. 58]

Przy połączeniu szeregowym kondensatorów wszystkie kondensatory mają taki sam ładunek.

Przy połączeniu szeregowym kondensatorów odwrotność pojemności zastępczej jest równa sumie odwrotności pojemności poszczególnych kondensatorów.

$$\frac{1}{C_z} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Przy połączeniu szeregowym kondensatorów o jednakowej pojemności, pojemność zastępcza jest równa pojemności jednego z kondensatorów podzielonej przez liczbę połączonych kondensatorów.

$$\text{jeżeli } C_1 = C_2 = C_3 = C' \text{ to } C_z = \frac{C'}{3}$$

4.1.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co to jest przenikalność elektryczna próżni?
2. Co to jest pole elektryczne?
3. Co to jest przenikalność względna środowiska?
4. Jakie znasz podstawowe własności pola elektrycznego?
5. Jak brzmi prawo Coulomba?
6. Co to jest pojemność elektryczna kondensatorów?
7. W jaki sposób oblicza się pojemność kondensatora płaskiego?
8. Od jakich wielkości zależy pojemność kondensatora?
9. Co nazywamy pojemnością przewodnika odosobnionego?

4.1.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

W jednorodnym polu elektrostatycznym filtra powietrza dostały się naładowane cząsteczki kurzu. Natężenie pola w filtrze wynosi 50kV/m , a zgromadzony ładunek ma wartość $3 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s}$. Oblicz siłę działającą na ten ładunek.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) skorzystać ze wzoru na natężenie pola elektrycznego,
- 2) obliczyć siłę działającą na ten ładunek.

Wyposażenie stanowiska pracy

- zeszyt,
- kalkulator,
- literatura uzupełniająca zgodna z punktem 6.

Ćwiczenie 2

Trzy kondensatory o następujących pojemnościach: $0,1 \mu\text{F}$; $0,22 \mu\text{F}$ i $0,68 \mu\text{F}$ są połączone szeregowo. Cały układ przyłączono na napięcie 100V . Oblicz C_z , Q_c , U_1 , U_2 i U_3 .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

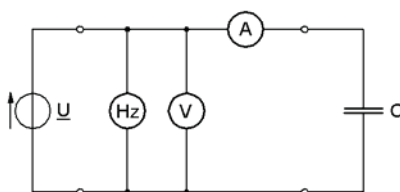
- 1) obliczyć pojemność zastępczą układu,
- 2) obliczyć ładunki kondensatorów,
- 3) obliczyć napięcie na poszczególnych kondensatorach.

Wyposażenie stanowiska pracy

- zeszyt,
- kalkulator,
- literatura uzupełniająca zgodna z punktem 6.

Ćwiczenie 3

Wykonaj pomiar pojemności metodą techniczną elementów zaproponowanych przez nauczyciela.



Układ do pomiaru pojemności metodą techniczną

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

Lp.	U[V]	I [mA]	$X_c[\Omega]$	$f_x[\text{Hz}]$	C [nF lub μF]
				100	
				100	

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę i elementy,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go sygnałem sinusoidalnie zmiennym o $U=5V$ i $f=100Hz$,
- 4) wykonać pomiary wartości skutecznych prądu oraz napięcia,
- 5) obliczyć wartości pojemności na podstawie wzorów:

$$X_c = \frac{U}{I} \quad C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c}$$

- 6) porównać obliczone wartości pojemności z oznaczeniami na wybranych elementach,
- 7) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy

- generator funkcyjny,
- częstotściomierz,
- multimetr cyfrowy i analogowy,
- kondensatory: $C = 10 \text{ nF}$, $C = 0,22 \text{ }\mu\text{F}$, $C = 0,47 \text{ }\mu\text{F}$, $C = 22 \text{ nF}$, $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$.

4.1.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) zdefiniować pojemność elektryczną?	☐	☐
2) obliczyć pojemność kondensatora płaskiego?	☐	☐
3) narysować układ szeregowy kondensatorów?	☐	☐
4) narysować układ równoległy kondensatorów?	☐	☐
5) obliczyć pojemność kondensatora?	☐	☐
6) obliczyć pojemność zastępczą dla połączenia szeregowego i równoległego kondensatorów?	☐	☐
7) zdefiniować prawo Coulomba?	☐	☐
8) wyjaśnić, co to jest przenikalność elektryczna w próżni?	☐	☐

4.2. Prąd przemienny jednofazowy

4.2.1. Materiał nauczania

Wielkości charakterystyczne prądu sinusoidalnego

Wartość chwilowa $i = I_m \cdot \sin \omega t$

gdzie: I_m – wartość maksymalna (amplituda),

ω – pulsacja (prędkość kątowna)

t – czas

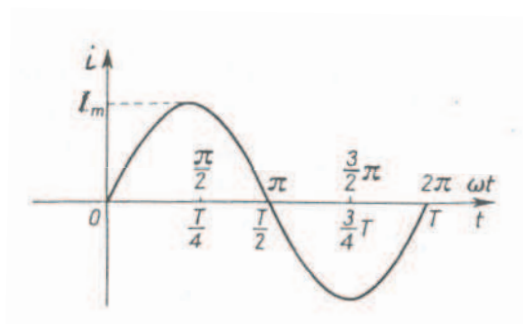
Okres prądu sinusoidalnego $T = \frac{2\pi}{\omega}$ [T] = s

Pulsacja $\omega = 2\pi f$ [ω] = rad/s.

Częstotliwość $f = \frac{1}{T}$ [f] = Hz (herc).

Wartość skuteczna prądu sinusoidalnego I:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m$$



Rys. 4. Wykres prądu sinusoidalnie zmiennego [3, s. 32]

Wartość średnia półokresowa prądu sinusoidalnego I_{sr} :

$$I_{sr} = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m$$

Analogicznie określa się wartość skuteczną i średnią napięcia sinusoidalnego:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m$$

$$U_{sr} = \frac{2}{\pi} U_m = 0,637 U_m$$

Wartość skuteczną oznacza się dużymi literami bez wskaźników. Wartości skuteczne prądów i napięć można mierzyć za pomocą mierników elektrodynamicznych i elektromagnetycznych. Wartości średnie prądów i napięć można mierzyć miernikami magnetoelektrycznymi.

W praktyce posługujemy się wartościami skutecznymi napięć i prądów.

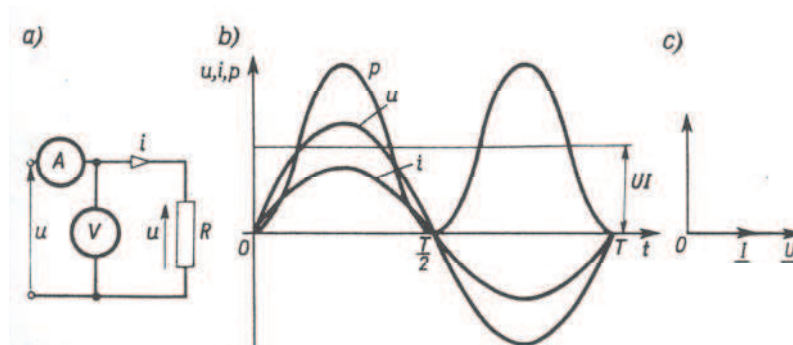
Obwód elektryczny z rezystancją, reaktancją i impedancją

Obwód elektryczny z rezystancją R:

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

$$I = \frac{U}{R} = G \cdot U$$

Napięcie na rezystancji jest w fazie z prądem (kąt przesunięcia fazowego między prądem i napięciem $\varphi = 0$)



Rys. 5. Obwód elektryczny z rezystancją R: a) układ połączeń, b) przebiegi u, i, ; c) wykres wektorowy wartości skutecznych prądu i napięcia [3, s. 33]

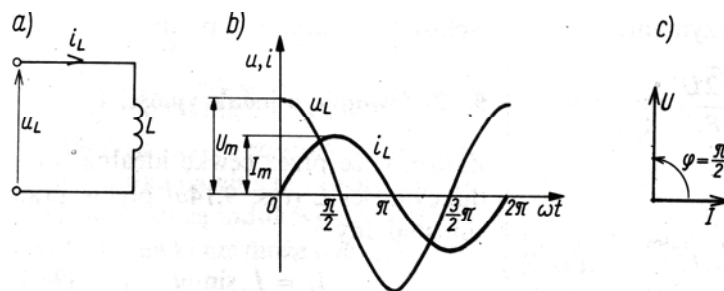
Obwód elektryczny z cewką o indukcyjności L

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}$$

$$I = \frac{U}{X_L} \quad \text{gdzie: } X_L - \text{reaktancja indukcyjna cewki}$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L \quad [X_L] = \Omega$$

Napięcie na cewce wyprzedza prąd o kąt 90° ($\frac{\pi}{2}$) lub prąd opóźnia się względem napięcia o kąt 90° .



Rys. 6. Obwód elektryczny z cewką o indukcyjności L: a) schemat dwójnika; b) wykres czasowy napięcia i prądu; c) wykres wektorowy [1, s. 170]

Obwód elektryczny z kondensatorem o pojemności C

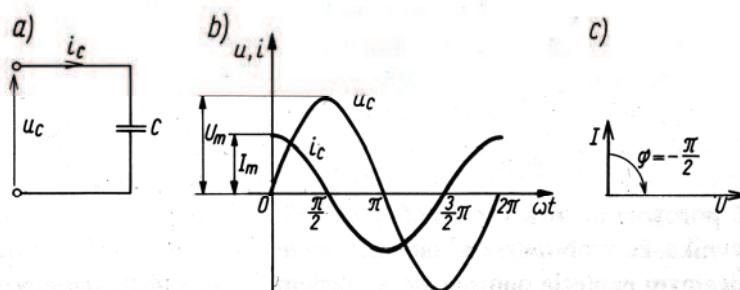
$$I_m = \frac{U_m}{X_C}$$

$$I = \frac{U}{X_C} \quad \text{gdzie: } X_C - \text{reaktancja pojemnościowa}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$[X_C] = \Omega$$

Napięcie na kondensatorze opóźnia się względem prądu o kąt 90° lub prąd wyprzedza napięcie na kondensatorze o kąt 90° .

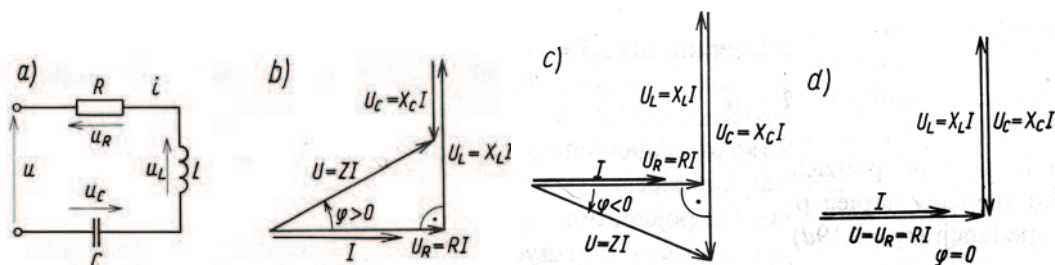


Rys. 7. Obwód elektryczny z kondensatorem C: a) schemat dwójnika; b) wykres czasowy napięcia i prądu; c) wykres wektorowy [1, s.171]

Obwód elektryczny z impedancją Z

$$\text{Impedancja } Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\text{Reaktancja } X = X_L - X_C$$



Rys. 8. Dwójnik szeregowy R, L, C: a) schemat dwójnika; b) wykres wektorowy dla $X_L > X_C$; c) wykres wektorowy dla $X_L < X_C$; d) wykres wektorowy dla $X_L = X_C$ [1, s.178]

Prawo Ohma dla prądu przemiennego

$$I = \frac{U}{Z} \text{ lub inne postacie } U = I \cdot Z; Z = \frac{U}{I}$$

$$\frac{1}{Z} = Y = \text{admitancja } [Y] = S \text{ (simens)}$$

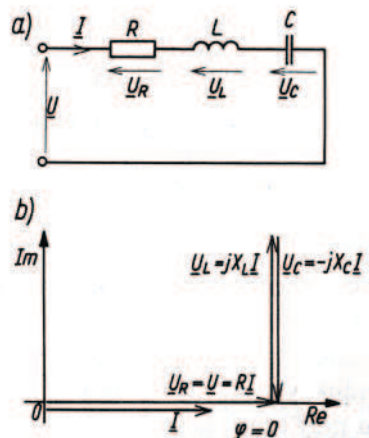
Rezonans napięć i prądów

Zjawisko rezonansu przedstawia taki stan pracy obwodu elektrycznego, przy którym reaktancja wypadkowa obwodu jest równa zero. Napięcie i prąd na zaciskach rozpatrywanego obwodu są zgodne w fazie.

Częstotliwością rezonansową (f_r) nazywamy częstotliwość, przy której reaktancja wypadkowa lub susceptancja wypadkowa obwodu jest równa zero.

Rezonans napięć

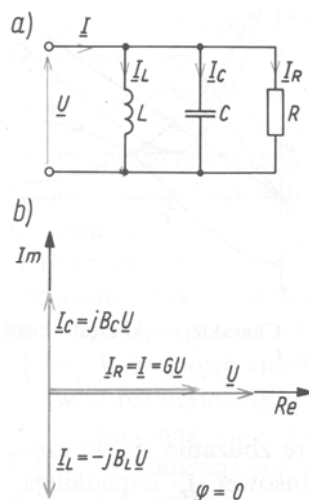
Rezonansem napięć lub rezonansem szeregowym nazywamy rezonans występujący w obwodzie o połączeniu szeregowym elementów R, L, C, charakteryzujący się równością reaktancji indukcyjnej i reaktancji pojemnościowej.



Rys. 9. Rezonans napięć w dwójniku szeregowym R, L, C: a) schemat obwodu; b) wykres wektorowy w stanie rezonansu [1,s.209]

Rezonans prądów

Rezonansem prądów lub rezonansem równoległym nazywamy rezonans występujący w obwodzie o połączeniu równoległym elementów R,L,C, charakteryzujący się równością susceptancji indukcyjnej i susceptancji pojemnościowej.



Rys. 10. Rezonans prądów w dwójniku równoległym R, L, C:
a) schemat obwodu; b) wykres wektorowy w stanie rezonansu [1,s.212]

4.2.2. Pytania sprawdzające:

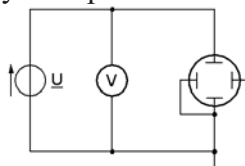
Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co nazywamy wartością skuteczną?
2. Co nazywamy wartością średnią?
3. Jak wygląda przebieg czasowy i wykres wektorowy prądu i napięcia dla cewki indukcyjnej?
4. Jak wygląda przebieg czasowy i wykres wektorowy prądu i napięcia dla kondensatora?
5. Jak zdefiniować prawo Ohma dla prądu przemiennego?
6. Jak wyjaśnić co to jest reaktancja cewki i kondensatora?
7. Co to jest impedancja i reaktancja obwodu RLC?
8. Co to jest zjawisko rezonansu?
9. Jakie są cechy charakteryzujące obwód, w którym występuje rezonans prądów?
10. Jakie są cechy charakteryzujące obwód, w którym występuje rezonans napięć?

4.2.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Wykonaj pomiar amplitudy, wartości międzyszczytowej oraz skutecznej napięcia sinusoidalnie zmiennego za pomocą oscyloskopu i woltomierza.



Układ do pomiaru amplitudy, wartości międzyszczytowej oraz skutecznej napięcia sinusoidalnie zmiennego

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

Lp.	L_y [działki]	C_y [działki/V]	U_{ss} [V]	U_m [V]	U [V]	Wskazanie woltomierza [V]

L_y - maksymalna wysokość oscylogramu; C_y - współczynnik odchyłania pionowego oscyloskopu

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś :

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go napięciem sinusoidalnie zmiennym,
- 4) wykonać pomiary wartości skutecznej napięcia sinusoidalnie zmiennego za pomocą woltomierza,
- 5) przerysować zaobserwowane oscylogramy, a wyniki pomiarów i obliczeń zapisać w tabeli,
- 6) obliczyć wartości napięć U_{ss} , U_m , U na podstawie wzorów:

$$U_{ss} = L_y C_y ; \quad U_m = \frac{L_y}{2} \cdot C_y \text{ wynika ze wzoru } U_m = \frac{U_{ss}}{2} ;$$

$$U = \frac{L_y}{2\sqrt{2}} \cdot C_y \text{ wynika ze wzoru } U_m = \frac{U_{ss}}{2 \cdot \sqrt{2}}$$

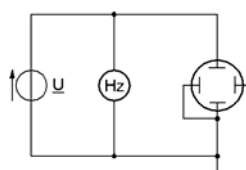
- 7) porównać obliczone wartości napięcia skutecznego U ze wskazaniami woltomierza,
- 8) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy

- generator funkcyjny,
- woltomierz napięcia zmiennego,
- oscyloskop.

Ćwiczenie 2

Wykonaj pomiar częstotliwości oraz okresu napięcia sinusoidalnie zmiennego za pomocą oscyloskopu i częstotliciemierza.



Układ do pomiaru częstotliwości i okresu napięcia sinusoidalnie zmiennego oscyloskopem i częstotliciemierzem.

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

Lp.	L_x [działki]	C_x [ms/działki]	T_x [ms]	f_x [Hz]	Wskazanie częstotliciemierza [Hz]

L_x - wartość okresu z oscylogramu; C_x - współczynnik odchylenia poziomego oscyloskopu

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienes :

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go napięciem sinusoidalnie zmiennym,
- 4) wykonać pomiary częstotliwości napięcia sinusoidalnie zmiennego częstotliciemierzem,
- 5) przerysować zaobserwowane oscylogramy, a wyniki pomiarów zapisać w tabeli,
- 6) obliczyć wartości T_x , f_x na podstawie wzorów:

$$T_x = L_x C_x \quad f_x = \frac{1}{T_x}$$

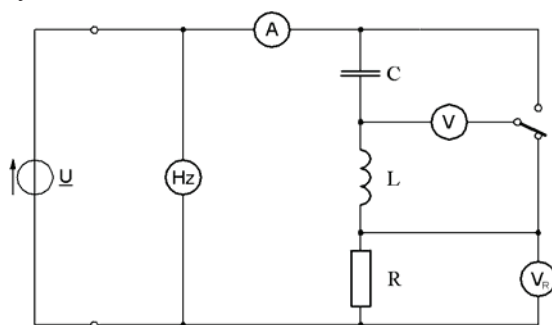
- 7) porównać obliczone wartości częstotliwości f_x ze wskazaniami częstotliciemierza,
- 8) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy

- generator funkcyjny,
- częstotliciemierz,
- oscyloskop.

Ćwiczenie 3

Zbadaj obwód szeregowy RLC.



Układ do badania obwodu szeregowego RLC

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

f [kHz]	0,1	0,5	1	3	5	7	9
I [mA]							
U_R [V]							
U_C [V]							
U_L [V]							
X_L [Ω]							
X_C [Ω]							
Z [Ω]							

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go napięciem sinusoidalnie zmiennym o wartości skutecznej $U=3V$, zmieniając częstotliwość w zakresie od 100Hz do 9kHz,
- 4) wykonać pomiary prądu I , napięcia U_R na rezystorze, U_C na kondensatorze i U_L na cewce,
- 5) obliczyć wartości reaktancji pojemnościowej X_C , reaktancji indukcyjnej X_L i impedancji Z obwodu z zależności:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

- 6) wyznaczyć charakterystyki impedancji Z , reaktancji pojemnościowej X_C , indukcyjnej X_L , oraz napięć U_R na rezystorze, U_C na kondensatorze i U_L na cewce w funkcji częstotliwości,
- 7) odczytać z otrzymanych wykresów wartość częstotliwości rezonansowej f_r ,
- 8) obliczyć wartość częstotliwości rezonansowej f_r na podstawie zależności:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}}$$

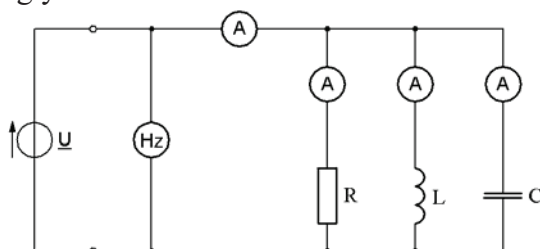
- 9) porównać wartości f_r otrzymane z wykresów i obliczeń,
- 10) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- generator funkcyjny,
- częstotściomierz,
- 2 multimetry cyfrowe i multimetr analogowy,
- rezystor $R = 470\Omega/2W$,
- cewka $L = 33mH$,
- kondensator $C = 47nF/250V$.

Ćwiczenie 4

Zbadaj obwód równoległy RLC



Układ do badania obwodu równoległego RLC

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

f[kHz]	1	2	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8
I [mA]										
I _R [mA]										
I _C [mA]										
I _L [mA]										
Z[Ω]										
U[V]										

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go napięciem sinusoidalnie zmiennym o wartości skutecznej $U=3V$, zmieniając częstotliwość w zakresie od 1kHz do 8kHz,
- 4) wykonać pomiary prądów: głównego I , I_R w gałęzi z rezystorem, I_C w gałęzi z kondensatorem, I_L w gałęzi z cewką.
- 5) obliczyć wartości impedancji Z obwodu z zależności:

$$Z = \frac{U}{I}$$

- 6) wyznaczyć charakterystyki impedancji Z oraz prądu I w funkcji częstotliwości,
- 7) odczytać z otrzymanych wykresów wartość częstotliwości rezonansowej f_r ,
- 8) obliczyć wartość częstotliwości rezonansowej f_r na podstawie zależności:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}},$$

- 9) porównać wartości f_r otrzymane z wykresów i obliczeń,
- 10) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- generator funkcyjny ze wskaźnikiem wartości skutecznej napięcia wyjściowego,
- częstotściomierz,
- 3 multimetry cyfrowe i multimetr analogowy,
- rezystor $R = 220\Omega/2W$,
- cewka $L = 33mH$,
- kondensator $C = 47nF/250V$.

4.2.4. Sprawdzian postępów

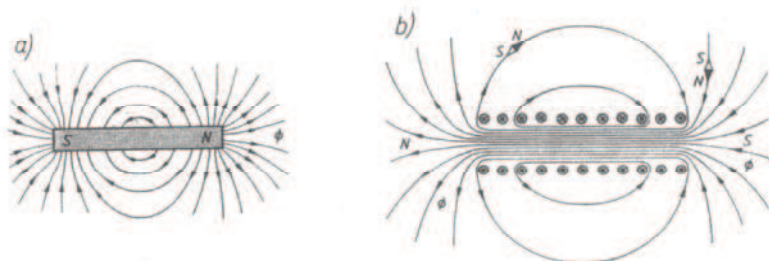
	Czy potrafisz:	Tak	Nie
1)	odczytać parametry prądu sinusoidalnie zmiennego z wykresu przebiegu czasowego tego prądu?	☐	☐
2)	narysować wykres przebiegu czasowego na podstawie parametrów przebiegu sinusoidalnego?	☐	☐
3)	obliczyć wartość reaktancji indukcyjnej obwodu na podstawie jego parametrów?	☐	☐
4)	wyznaczyć doświadczalnie częstotliwość rezonansową w układzie szeregowym RLC?	☐	☐
5)	wyznaczyć doświadczalnie częstotliwość rezonansową w układzie równoległym RLC?	☐	☐
6)	określić zmiany reaktancji indukcyjnej przy zmianach częstotliwości?	☐	☐
7)	określić zmiany reaktancji pojemnościowej przy zmianach częstotliwości?	☐	☐
8)	narysować wykres wektorowy prądów w obwodzie równoległym RLC?	☐	☐

4.3. Pole magnetyczne i elektromagnetyczne

4.3.1. Materiał nauczania

Pole magnetyczne może być wytworzone przez:

- a) magnes trwały
- b) elektromagnes



Rys. 11. Obraz pól magnetycznych wytworzonych przez: a) magnes trwały; b) elektromagnes [4, s. 25]

Obwodem magnetycznym nazywamy zespół elementów tworzących drogę zamkniętą dla strumienia magnetycznego.

Indukcja elektromagnetyczna

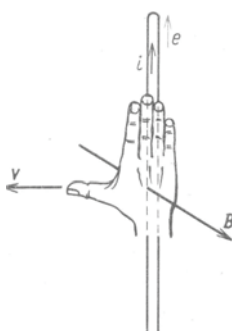
Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na indukowaniu się napięcia nazywanego siłą elektromotoryczną SEM w przewodzie poruszającym się w polu magnetycznym lub w zamkniętym obwodzie obejmującym zmienny w czasie strumień magnetyczny.

Napięcie indukowane w przewodzie poruszającym się w polu magnetycznym jest wprost proporcjonalne do długości czynnej przewodu l , prędkości poruszania przewodnika v oraz indukcji magnetycznej B .

Indukcja B określa intensywność pola magnetycznego:

$$E = B \cdot l \cdot v \quad [B] = T \quad (\text{tesla})$$

Kierunek indukowanej siły elektromotorycznej wyznaczamy za pomocą reguły prawej dłoni.



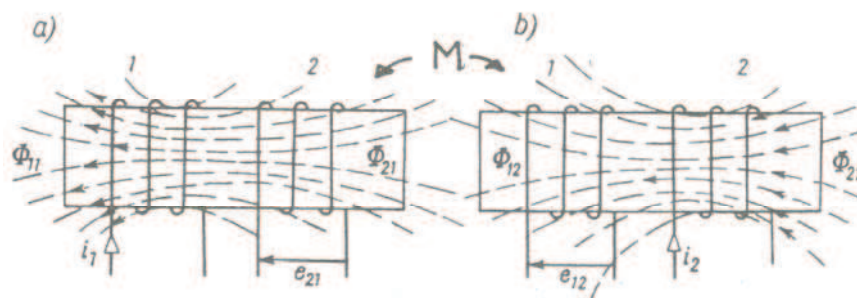
Rys. 12. Stosowanie reguły prawej dłoni [1, s. 136]

Zjawisko indukcji własnej i wzajemnej

Zjawisko indukcji własnej jest to indukowanie się siły elektromotorycznej w cewce pod wpływem zmian prądu płynącego w tej cewce. Siłę elektromotoryczną indukcji własnej nazywamy siłą elektromotoryczną samoindukcji e_L .

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad [L] = H \quad (\text{henr})$$

Wielkość L oznacza indukcyjność własną cewki.



Rys. 13. Indukowanie siły elektromotorycznej: a) w cewce 2 przy zmianie prądu w cewce 1; b) w cewce 1 przy zmianie prądu w cewce 2 [4,s.27]

Zjawisko indukcji wzajemnej jest to indukowanie się siły elektromotorycznej w cewce pod wpływem zmian prądu w drugiej cewce z nią sprzężonej. Siła elektromotoryczna indukcji wzajemnej wyraża się wzorem:

$$e_M = -M \frac{di}{dt} \quad [M] = H \text{ (henr)}$$

wielkość M – indukcyjność wzajemna.

Wielkości charakteryzujące pole magnetyczne:

- natężenie pola magnetycznego H , jednostką jest $[A/m]$
- indukcja magnetyczna B jest wielkością charakteryzującą gęstość linii sił pola magnetycznego, jednostką jest $B = [Vs/m^2] = [T]$ (Tesla)
- strumień magnetyczny Φ , jednostką jest $[Wb] = [V \cdot s]$ (weber)

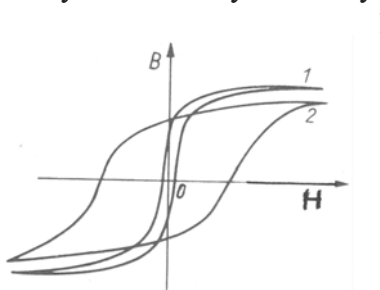
Własności magnetyczne materiałów

Ze względu na przenikalność magnetyczną względną μ_r rozróżniamy następujące grupy materiałów:

- ferromagnetyczne (stal elektrotechniczna, stopy Alnico, ferryty), w których μ_r jest dużo większa od 1,
- paramagnetyczne (platyna, powietrze, aluminium), w których μ_r jest nieco większa od 1,
- diamagnetyczne (rtęć, woda, bizmut, miedź), w których μ_r jest nieco mniejsza od 1.

W zależności od kształtu pętli histerezy rozróżniamy materiały :

- magnetyczne miękkie
- magnetyczne twarde



Rys. 14. Pętla histerezy [1,s.125]

1 – materiału magnetycznie miękkiego, 2 - materiału magnetycznie twardego

Zastosowanie materiałów magnetycznych:

Materiały magnetycznie miękkie stosuje się do budowy :

- silników elektrycznych (blacha twornika),

- przekładników,
- transformatorów sieciowych,
- cewek z rdzeniem (ferryty).

Materiały magnetycznie twarde stosuje się do budowy magnesów trwałych.

Indukcyjność własna i wzajemna cewki.

Indukcyjność własna

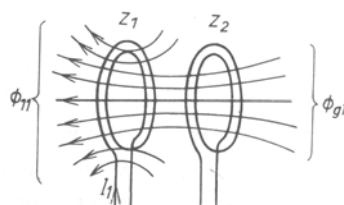
Stosunek strumienia skojarzonego cewki Ψ do prądu I płynącego przez cewkę nazywamy indukcyjnością własną cewki.

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad L - \text{indukcyjność własna}$$

$$\text{Jednostką indukcyjności jest 1 henr [1H]} \quad [L] = \frac{[\Psi]}{[I]} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \Omega \cdot \text{s} = \text{H}$$

Indukcyjność wzajemna

Dwa elementy ułożone względem siebie w taki sposób, że pole magnetyczne jednego z nich przenika, choćby częściowo, element drugi nazywamy elementami sprzężonymi magnetycznie.



Rys. 15. Dwie cewki sprzężone magnetycznie [1,s.127]

Indukcyjnością wzajemną cewki pierwszej z drugą nazywamy stosunek strumienia magnetycznego wytworzonego w cewce pierwszej 1 i skojarzonego z cewką drugą 2, do prądu płynącego w cewce 1. Oznaczamy M_{12}

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}$$

Współczynnikiem sprzężenia cewki pierwszej z cewką drugą (drugiej z pierwszą) nazywamy stosunek strumienia magnetycznego głównego cewki pierwszej (drugiej) do strumienia całkowitego tej cewki .

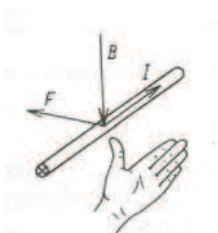
Zapamiętaj ! – Cewka jest elementem zdolnym do gromadzenia energii w polu magnetycznym.

Zjawisko elektrodynamiczne

Jeśli w polu magnetycznym znajdują się przewodniki z prądem, to na przewodnik działa siła F .

$$F = B \cdot I \cdot l$$

Wielkość siły zależy od indukcji magnetycznej B , natężenia prądu I i długości czynnej przewodu l . Kierunek działania siły określa się stosując regułę lewej dłoni.



Rys. 16. Reguła lewej dłoni [5,s.39]

Zasada działania prądnicy i silnika prądu stałego

Zjawisko indukowania się siły elektromotorycznej w przewodniku w poruszającym się polu magnetycznym oraz oddziaływania pola magnetycznego na prąd elektryczny są podstawą przemiany energii mechanicznej w energię elektryczną i odwrotnie.

Przemiany te odbywają się w maszynach elektrycznych, które dzielimy na:

- silniki elektryczne wykonujące pracę mechaniczną kosztem pobieranej energii elektrycznej.
- prądnice elektryczne wytwarzające energię elektryczną kosztem dostarczonej im pracy mechanicznej.

4.3.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co nazywamy obwodem magnetycznym?
2. Co określa reguła prawej dłoni?
3. W jaki sposób wyznaczamy kierunek pola magnetycznego?
4. Co to jest zjawisko indukcji własnej?
5. Jakie wielkości charakteryzują pole magnetyczne?
6. Co to jest indukcja wzajemna?

4.3.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz wartość indukcji pola magnetycznego powstałego w cewce o przekroju poprzecznym $S=10 \text{ cm}^2$, jeśli wytworzony w niej strumień magnetyczny $\Phi = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

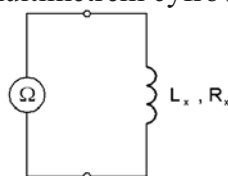
- 1) skorzystać ze wzoru na strumień magnetyczny
- 2) następnie należy dokonać przekształcenia tego wzoru,
- 3) obliczyć indukcję magnetyczną.

Wypożyczenie stanowiska pracy

- zeszyt,
- kalkulator,
- literatura uzupełniająca zgodna z punktem 6.

Ćwiczenie 2

Wykonaj pomiar rezystancji cewek multimetrem cyfrowym.



Układ do pomiaru rezystancji cewek multimetrem cyfrowym

Tabela wyników pomiarów

	$L_1 = 10\text{mH}$	$L_2 = 33\text{mH}$	$L_3 = 100\text{mH}$	$L_4 = 220\text{mH}$
R [Ω]				

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

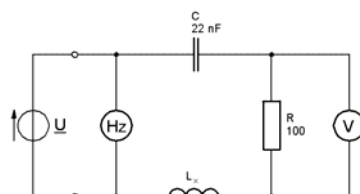
- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę i elementy,
- 3) połączyć obwód elektryczny,
- 4) wykonać pomiary rezystancji cewek omomierzem,
- 5) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy :

- multimetr cyfrowy,
- cewki $L=10\text{mH}$, $L=33\text{mH}$, $L=100\text{mH}$, $L=220\text{mH}$.

Ćwiczenie 3

Wykonaj pomiar indukcyjności, elementów zaproponowanych przez nauczyciela metodą rezonansową.



Układ do pomiaru indukcyjności metodą rezonansową

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

Lp.	$f_r[\text{Hz}]$	$L [\text{mH}]$

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę i elementy,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go sygnałem sinusoidalnie zmiennym o $U=1\text{V}$, zmieniając częstotliwość od 100Hz do 100kHz,
- 4) określić częstotliwość rezonansową f_r przy której wskazanie woltomierza jest największe,
- 5) obliczyć wartość indukcyjności każdej z badanych cewek na podstawie wzoru:

$$L = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_r^2 \cdot C}$$

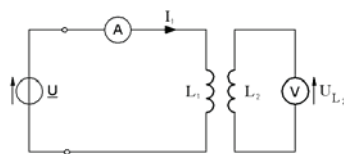
- 6) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- generator funkcyjny,
- częstotliciomierz, multimetr cyfrowy lub analogowy,
- kondensator $C = 22\text{nF}$,
- cewki $L = 10\text{mH}$, $L = 33\text{mH}$, $L = 100\text{mH}$, $L = 220\text{mH}$,
- rezystor $R = 100\Omega/2\text{W}$.

Ćwiczenie 4

Wykonaj pomiar indukcyjności wzajemnej cewek sprzężonych magnetycznie.



Układ do pomiaru indukcyjności wzajemnej cewek sprzężonych magnetycznie.

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

Lp.	L_1 [mH]	L_2 [mH]	I [mA]	U_2 [V]	M [mH]	k
	70	70				
	140	140				
	70	140				
	140	70				

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanalizować schemat pomiarowy i skompletować potrzebną aparaturę oraz elementy,
- 2) połączyć obwód elektryczny i zasilić go sygnałem sinusoidalnie zmiennym o $U=9V$ i częstotliwości $f = 1 \text{ kHz}$,
- 3) wykonać pomiary prądu I po stronie pierwotnej układu i napięcia U_{L2} po stronie wtórnej,
- 4) obliczyć wartość indukcyjności wzajemnej cewek M oraz ich współczynnika sprzężenia k z poniższych wzorów:

$$M = \frac{U_{L2}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I} \quad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

- 5) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy

- generator funkcyjny,
- multimetr cyfrowy i analogowy,
- 4 cewki z rdzeniem ferromagnetycznym: 2 cewki o $L = 70\text{mH}$ i 2 cewki o $L = 140\text{mH}$.

4.3.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- 1) wyjaśnić zjawisko elektrodynamiczne?
- 2) omówić właściwości magnetyczne materiałów?
- 3) wyjaśnić, co nazywamy indukcją elektromagnetyczną?
- 4) narysować układ równoległy kondensatorów?
- 5) omówić zasadę działania prądnicy prądu stałego?
- 6) narysować obraz pól magnetycznych?

Tak **Nie**

☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐

4.4. Rodzaje mocy w obwodzie prądu sinusoidalnego

4.4.1. Materiał nauczania

Mocą czynną nazywamy wartość średnią mocy chwilowej i określamy ją wzorem

$$P = UI \cos \varphi$$

gdzie:

φ - kat przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem,

$\cos \varphi$ - współczynnik mocy

Jednostką mocy czynnej jest 1 wat [1 W].

Jeżeli moc czynną P pomnożymy przez czas T , to otrzymamy energię pobraną przez odbiornik ze źródła w czasie jednego okresu.

Moc pozorna oznaczana jest przez S i definiowana jako iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu.

Moc pozorna ma istotne znaczenie dla urządzeń elektrycznych ze względu na ich określone wartości znamionowe napięcia i prądu, wynikające z wytrzymałości izolacji i dopuszczalnych wartości prądu

$$S = UI$$

Jednostką mocy pozornej jest 1 woltoamper [VA].

W obwodach elektrycznych znajduje zastosowanie jeszcze trzecia wielkość zwana mocą bierną, oznaczana przez Q i definiowana jako iloczyn wartości skutecznych napięcia, prądu i sinusa kąta przesunięcia fazowego między nimi.

$$Q = UI \sin \varphi$$

Jednostką mocy biernej jest 1 war [1 var].

Z powyższych wzorów wynika, że moc czynna, bierna i pozorna są związane zależnością

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \text{czyli}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Dla zależności wiążących poszczególne moce podaje się ilustrację (graficzną) w postaci trójkąta mocy, który jest pomocny przy analizie obwodów. Moc bierna może przyjmować wartość dodatnią, gdy kąt fazowy jest dodatni (odbiornik rezystancyjno – indukcyjny) lub może mieć wartość ujemną, gdy kąt fazowy jest ujemny (odbiornik rezystancyjno – pojemnościowy).



Rys.17. Trójkąty mocy: a) odbiornik pojemnościowy, b) odbiornik indukcyjny [1,s.200]

4.4.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co to jest współczynnik mocy?
2. Co to jest moc czynna?
3. Jaka jest zależność między mocą czynną, bierną i pozorną?

4.4.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie1

Silnik indukcyjny jednofazowy zasilany napięciem $U = 230 \text{ V}$ posiada następujące dane: $P_{\text{odd}} = 1,1 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,98$ oraz $\eta = 74\%$. Oblicz wartość prądu pobieranego z sieci oraz moc.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

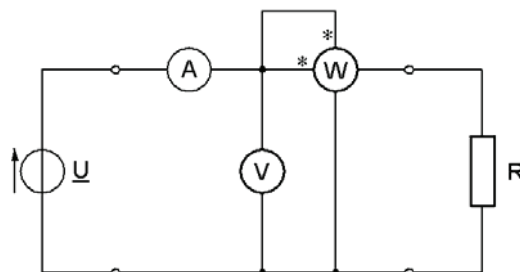
- 1) skorzystać ze wzoru na sprawność, następnie przekształcić wzór
- 2) obliczyć moc.

Wypożyczenie stanowiska pracy

- zeszyt,
- kalkulator,
- literatura uzupełniająca zgodna z punktem 6.

Ćwiczenie 2

Wykonaj pomiary mocy prądu przemiennego.



Układ do pomiaru mocy prądu przemiennego

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

Lp.	U[V]	I [A]	P[W]	Wskazanie watomierza [W]

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę i elementy,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go napięciem z autotransformatora zmieniając jego wartość co 10V w zakresie od 0 V do 100V,
- 4) wykonać pomiary prądu I napięcia U oraz mocy P za pomocą watomierza,
- 5) obliczyć wartość mocy na podstawie wskazań woltomierza i amperomierza, korzystając ze wzoru: $P=UI\cos\varphi$, gdzie dla badanego obwodu $\cos\varphi=1$,
- 6) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy

- autotransformator,
- 2 multimetry cyfrowe, watomierz,
- rezystor $R=100\Omega/100W$.

4.4.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- 1) zdefiniować moc czynną i bierną?
- 2) obliczyć moc silnika?
- 3) wymienić wielkości mocy czynnej, pozornej i biernej?
- 4) wyjaśnić podstawowe jednostki mocy?
- 5) wyjaśnić, co to jest współczynnik mocy?

Tak **Nie**

☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐
☐	☐

4.5. Filtry częstotliwościowe

4.5.1. Materiał nauczania

Filtr częstotliwościowy to czwórnik, który przepuszcza bez tłumienia lub z małym tłumieniem napięcia i prądy o określonym paśmie częstotliwości, a tłumi napięcia i prądy leżące poza tym pasmem.

Parametry filtrów częstotliwościowych to:

- pasmo przepustowe – zakres częstotliwości, które filtry przepuszczają,
- pasmo tłumieniowe - zakres częstotliwości, które filtry tłumią,
- częstotliwość graniczna f_0 – oddziela pasmo przepustowe i tłumieniowe,
- współczynnik tłumienia a – miara zmian napięcia przy przejściu od zacisków wejściowych do zacisków wyjściowych filtra, w paśmie przepustowym $a=0$ (lub jest bliskie zeru), w paśmie tłumieniowym a jest bardzo duże,
- współczynnik fazowy b – określa zmiany fazy napięcia i prądu przy przejściu sygnału przez filtr,
- charakterystyka częstotliwościowa – określa napięcie wyjściowe w funkcji częstotliwości (zwyczajowo jest to funkcja pulsacji ω).

Ze względu na położenie pasma przepustowego filtry dzielimy na:

- dolnoprzepustowe,
- górnoprzepustowe,
- pasmowe,
- zaporowe.

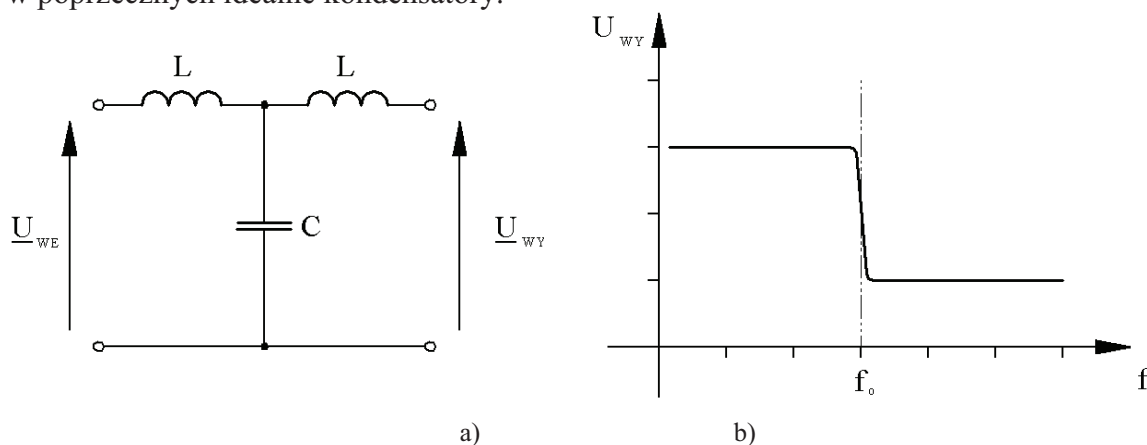
Ze względu na budowę filtry dzielimy na:

- reaktancyjne LC – zbudowane z cewek i kondensatorów,
- bezindukcyjne, pasywne RC - zbudowane z rezystorów i kondensatorów,
- piezoceramiczne,
- aktywne.

Filtry mogą mieć strukturę czwórników typu: T, Π lub Γ .

Filtry dolnoprzepustowe

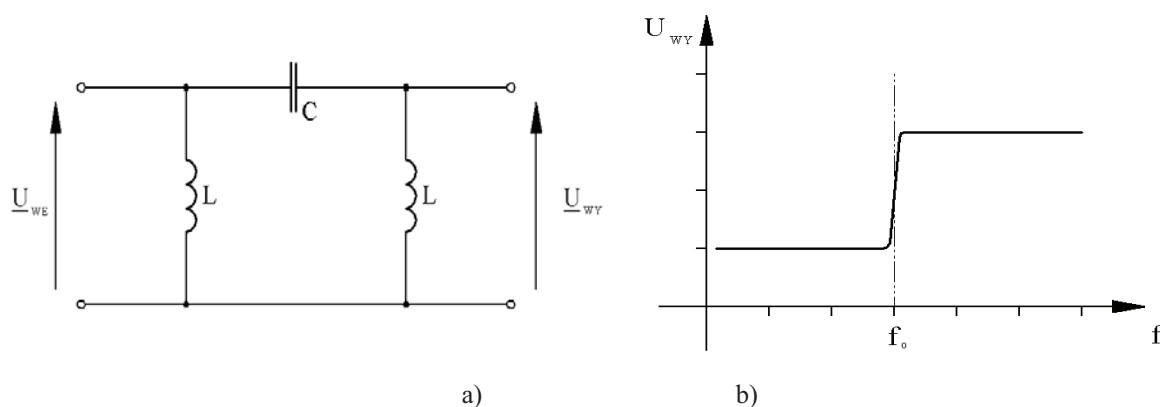
Filtry dolnoprzepustowe przepuszczają sygnały o częstotliwościach z zakresu od 0 do częstotliwości granicznej f_0 . W gałęziach podłużnych występują idealne cewki, a w poprzecznych idealne kondensatory.



Rys. 18. Filtr dolnoprzepustowy: a)schemat, b) charakterystyka częstotliwościowa [1,s.308]

Filtry górnoprzepustowe

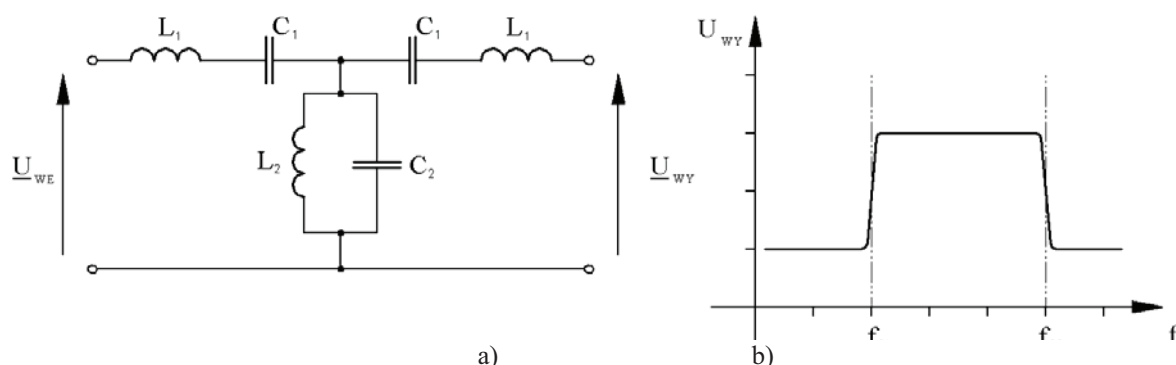
Filtry górnoprzepustowe przepuszczają sygnały o częstotliwościach z zakresu od częstotliwości granicznej f_0 do nieskończoności. W gałęziach podłużnych występują idealne kondensatory, a w poprzecznych idealne cewki.



Rys. 19. Filtr górnoprzepustowy: a) schemat, b) charakterystyka częstotliwościowa [1, s. 308]

Filtry pasmowe

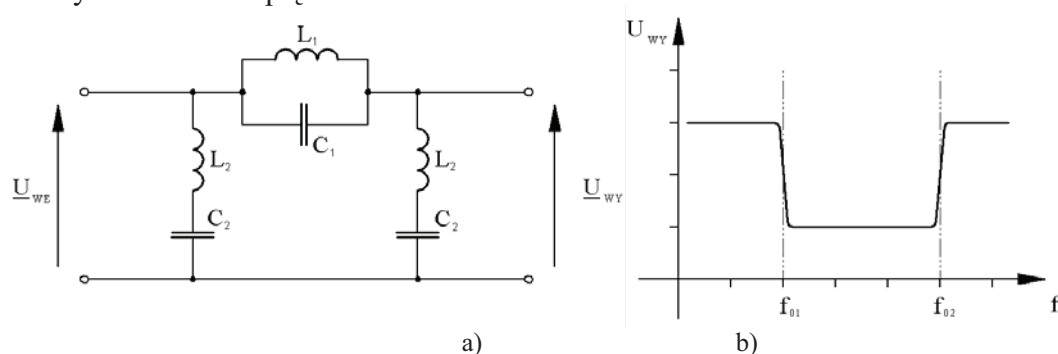
Filtry pasmowe przepuszczają sygnały o częstotliwościach z zakresu od częstotliwości granicznej f_{01} do częstotliwości granicznej f_{02} . Częstotliwości f_{01} i f_{02} są częstotliwościami granicznymi. W gałęziach podłużnych tych filtrów występują obwody rezonansu napięć, a w poprzecznych zazwyczaj obwody rezonansu prądów (choć może być sam kondensator).



Rys. 20. Filtr pasmowy: a) schemat, b) charakterystyka częstotliwościowa [1, s. 311]

Filtry zaporowe

Filtry zaporowe przepuszczają sygnały o wszystkich częstotliwościach za wyjątkiem sygnałów określonego pasma ograniczonego częstotliwościami granicznymi f_{01} i f_{02} . W gałęziach podłużnych tych filtrów występują obwody rezonansu prądów, a w poprzecznych obwody rezonansu napięć.

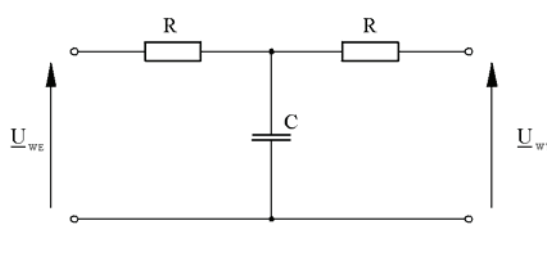


Rys. 21. Filtr zaporowy: a) schemat, b) charakterystyka częstotliwościowa [1, s. 311]

Filtry pasywne RC

Realizowane są za pomocą rezystorów i kondensatorów. W konstrukcji tych filtrów zrezygnowano z cewek, ponieważ elementy te sprawiają największe kłopoty, przede wszystkim nie mogą być realizowane w technice scalonej.

Mają one parametry trochę gorsze niż filtry reaktancyjne. Najczęściej wykonywane są jako układy zminiaturyzowane.



Rys. 22. Filtr RC [1, s. 312]

Filtry aktywne

Budowane są z wykorzystaniem wzmacniaczy, rezystorów i kondensatorów. Prócz właściwości typowych filtrów wzmacniają również przepuszczane sygnały.

4.5.2. Pytania sprawdzające

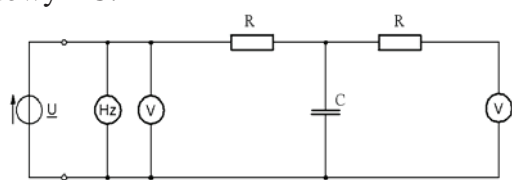
Odpowiadając na pytania, sprawdzisz czy jesteś przygotowany do ćwiczeń.,

1. Jakie funkcje spełnia filtr częstotliwościowy?
2. Jak dzielimy filtry częstotliwościowe ze względu na przepuszczane częstotliwości?
3. Jakie są podstawowe parametry filtrów częstotliwościowych?
4. Jak dzielimy filtry ze względu na budowę?
5. Jak zbudowane są i czym charakteryzują się filtry dolnoprzepustowe?
6. Jak zbudowane są i czym charakteryzują się filtry górnoprzepustowe?
7. Jak zbudowane są i czym charakteryzują się filtry pasmowe?
8. Jak zbudowane są i czym charakteryzują się filtry zaporowe?
9. Czym różnią się filtry aktywne od reaktancyjnych?
10. Jakie są różnice w budowie między filrami reaktancyjnymi a pasywnymi RC?
11. Jakie zalety posiadają filtry pasywne RC?

4.5.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Zbadaj filtr dolnoprzepustowy RC.



Układ do badania filtra dolnoprzepustowego RC

Tabela wyników pomiarów i obliczeń

f[Hz]	40	80	100	200	400	800	1k	2k	4k	8k	10k	20k
U_{we} [V]												
U_{wy} [V]												

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę i elementy,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go sygnałem napięcie sinusoidalnie zmiennym o $U=1V$ i częstotliwościach zmienianych w zakresie od 40Hz do 20kHz,
- 4) wykonać pomiary napięcia U_{we} na wejściu układu i U_{wy} na jego wyjściu,
- 5) wyznaczyć charakterystykę częstotliwościową badanego filtra,
- 6) określić wartość częstotliwości granicznej f_0 oraz pasmo przepustowe filtra (częstotliwość graniczna wyznaczana jest przy spadku wartości sygnału wyjściowego o 3 decybele),
- 7) obliczyć stałą czasową τ badanego obwodu z zależności: $\tau = R \cdot C$ i na jej podstawie ponownie określić częstotliwość graniczną $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau}$,
- 8) porównać obie wartości częstotliwości granicznej f_0 ,
- 9) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy

- generator funkcyjny,
- częstotlicznik, 2 multimetry cyfrowe,
- 2 rezystory $R=470\Omega/2W$, kondensator $C=0,22 \mu F/400V$.

4.5.4 Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) sklasyfikować filtr ze względu jego na pasmo przepustowe na podstawie schematu elektrycznego?	☐	☐
2) zdefiniować parametry filtrów?	☐	☐
3) sklasyfikować filtry ze względu na budowę?	☐	☐
4) określić częstotliwość graniczną filtra na podstawie charakterystyki częstotliwościowej?	☐	☐
5) określić pasmo przepustowe filtra na podstawie charakterystyki częstotliwościowej?	☐	☐
6) zaprojektować układ pomiarowy do określenia charakterystyki częstotliwościowej filtra?	☐	☐
7) zaproponować strukturę filtra o określonym paśmie przepustowym?	☐	☐
8) opisać budowę filtra pasywnego o danym paśmie przepustowym?	☐	☐
9) narysować schemat przykładowego filtra dolnoprzepustowego?	☐	☐
10) narysować schemat przykładowego filtra górnoprzepustowego?	☐	☐
11) narysować schemat przykładowego filtra pasmowego?	☐	☐
12) narysować schemat przykładowego filtra zaporowego?	☐	☐

4.6. Transformator

4.6.1. Materiał nauczania

Transformator jest to urządzenie elektroenergetyczne przetwarzające energię elektryczną na energię elektryczną o innych parametrach, za pomocą pola elektromagnetycznego bez udziału ruchu. Przy przetwarzaniu uzyskuje się zmianę napięcia i prądu przy stałej wartości częstotliwości.

Do podstawowych zadań transformatorów należy:

- zmiana wartości napięcia sinusoidalnie zmiennego,
- oddzielenie (czyli separacja odbiornika) obwodów dla prądu przemiennego,
- dopasowanie obwodów elektrycznych prądu zmiennego.

Podstawowymi elementami transformatora są:

- rdzeń,
- uzwojenie pierwotne,
- uzwojenie wtórne.

Rdzeń transformatora składa się z blach elektrotechnicznych odizolowanych od siebie lakierem, warstwą tlenków lub specjalną izolacją. Poziome elementy rdzenia nazywamy jarzmem, a pionowe kolumnami. Rdzeń służy do przewodzenia strumienia magnetycznego.

Do podstawowych parametrów transformatora zaliczamy:

- napięcie znamionowe strony pierwotnej i wtórnej,
- prądy znamionowe strony pierwotnej i wtórnej,
- grupę połączeń (dla transformatorów trójfazowych),
- przekładnię napięciową,
- moc pozorną,
- sprawność transformatora

Transformator może pracować w trzech stanach pracy

- 1) w stanie jałowym;
- 2) w stanie obciążenia;
- 3) w stanie zwarcia.

Bardzo szerokie zastosowanie w technice znalazły transformatory specjalne: przekładnik prądowy i napięciowy, spawalniczy, autotransformator, transformatory wielkiej częstotliwości. Poza tym w elektrotechnice transformatory stosuje się do budowy zasilaczy sieciowych i przetwornic transformatorowych.

Stan jałowy transformatora

W stanie jałowym uzwojenie pierwotne jest włączone do sieci, a uzwojenie wtórne jest rozwarte. Prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym nazywamy **prądem jałowym**; w transformatorach mocy stanowi około 1...10% prądu znamionowego.

Stan obciążenia transformatora

Stanem obciążenia transformatora nazywamy taki stan pracy, w którym uzwojenie pierwotne jest zasilane napięciem znamionowym, a w obwód wtórny jest włączony odbiornik.

W stanie obciążenia transformatora w obu uzwojeniach płyną prądy.

Stan zwarcia transformatora

Stanem zwarcia transformatora nazywamy taki stan, w którym do uzwojenia pierwotnego jest doprowadzone napięcie zasilające, a uzwojenie wtórne jest zwarte.

Napięcie na zaciskach zwartego uzwojenia jest równe zero.

Zwarcie występujące przy pełnym napięciu zasilającym nazywamy **zwarcie awaryjnym**.

Prąd płynący w uzwojeniach transformatora jest wówczas od kilku do kilkudziesięciu razy większy od prądu znamionowego.

Stan ten jest niebezpieczny dla transformatorów z dwóch powodów:

- powstają duże siły dynamiczne działające na uzwojenia
- całkowita moc pobrana w tym stanie wydzielą się w postaci ciepła, co powoduje wzrost temperatury uzwojeń a w konsekwencji uszkodzenie transformatora.

Zwarcie pomiarowe realizowane jest w warunkach laboratoryjnych .

Napięcie zwarcia jest to napięcie doprowadzone do pierwotnych zacisków transformatora przy zwartym uzwojeniu wtórnym, pod wpływem którego w uzwojeniach transformatora płyną prądy znamionowe.

$$u_z = \frac{U_z}{U_N}$$
$$u_z \% = \frac{U_z}{U_N} \cdot 100 \%$$

gdzie: u_z - względne napięcie zwarcia

U_z = napięcie zwarcia [V]

U_N = napięcie znamionowe [V]

Transformatory specjalne

Duże zastosowanie w technice znalazły transformatory specjalne.

Zaliczamy do nich np.:

- **autotransformatory** są transformatorami, które mają tylko jedno uzwojenie (część uzwojenia jest wspólna zarówno dla pierwotnego jak i wtórnego napięcia),
- **transformatory trójuzwojeniowe** - mają po trzy uzwojenia na każdej kolumnie. Są to uzwojenia: górnego napięcia (**GN**), średniego napięcia (**SN**) i dolnego napięcia (**DN**); transformatory takie są stosowane w energetyce,
- **przekładniki** stosowane są w celu obniżenia wartości napięcia lub prądu dla dokonania pomiarów lub dla galwanicznego oddzielenia obwodu pomiarowego od sieci wysokiego napięcia,
- **transformatory spawalnicze**.

Sprawność transformatorów

Sprawność znamionowa transformatora – jest to sprawność przy obciążeniu znamionowym, współczynnika mocy odbiornika równym jeden, znamionowej wydajności urządzeń pomocniczych oraz przy temperaturze uzwojeń równej 75° C.

4.6.2. Pytania sprawdzające

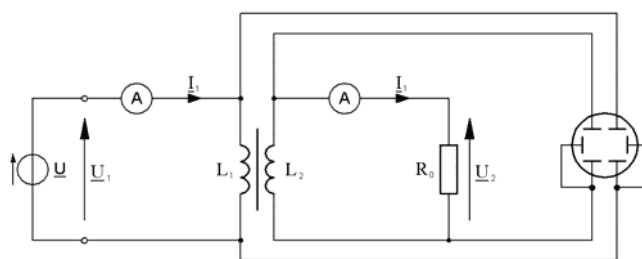
Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Z czego zbudowany jest transformator?
2. Jakie znasz podstawowe parametry transformatora?
3. Jakim urządzeniem jest transformator?
4. Narysować schemat zastępczy transformatora?
5. Jakie podstawowe zadania spełnia transformator?
6. Z jakich podstawowych elementów zbudowany jest transformator?

4.6.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Wykonaj badania transformatora jednofazowego.



Układ do badania transformatora jednofazowego

Tabele wyników pomiarów i obliczeń

$U_{1ss}[V]$	$U_{2ss}[V]$	$I_1[mA]$	$I_2[mA]$	N_1	N_2	$R_0[k\Omega]$	$P_1[mW]$	$P_2[mW]$	$\eta\%$	v
				1700	1700	∞				
				1700	1700	0,1				
				1700	1700	1				
				1700	1700	4,7				
				1700	850	1				
				850	1700	1				

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zanalizować schemat pomiarowy,
- 2) skompletować potrzebną aparaturę i elementy,
- 3) połączyć obwód elektryczny i zasilić go sygnałem sinusoidalnie zmiennym wartości międzyszczytowej $U_{ss}=6V$ i $f=100Hz$,
- 4) wykonać pomiary napięcia i prądu po stronie pierwotnej układu i po stronie wtórnej zmieniając liczbę uzwojeń N_1 i N_2 oraz wartość rezystancji obciążenia R_0 . Powtórzyć pomiary po włożeniu między rdzeń transformatora izolatora (kawałka papieru),
- 5) obliczyć moc pobraną przez uzwojenie pierwotne transformatora P_1 , moc oddaną przez uzwojenie wtórne P_2 , sprawność transformatora $\eta\%$ i przekładnię zwojową v według zależności:

$$P_1 = I_1 \cdot U_1; \quad P_2 = I_2 \cdot U_2; \quad \eta\% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%; \quad v = \frac{N_2}{N_1}.$$

- 6) oszacować dokładność pomiarów i sformułować wnioski.

Wypożyczenie stanowiska pracy

- generator funkcyjny,
- multimetr cyfrowy i analogowy,
- oscyloskop dwukanałowy, multimetr cyfrowy i analogowy,
- 2 cewki z rdzeniem ferromagnetycznym o $L=70\text{mH}$ i liczbie zwojów $N_1=850$, oraz 2 cewki z rdzeniem ferromagnetycznym o $L=140\text{mH}$ i liczbie zwojów $N_2=1700$,
- rezystory $R=100\ \Omega/2\text{W}$, $R=4,7\ \text{k}\Omega/1\text{W}$, $R=1\ \text{k}\Omega/1\text{W}$

4.6.4. Sprawdzian postępów

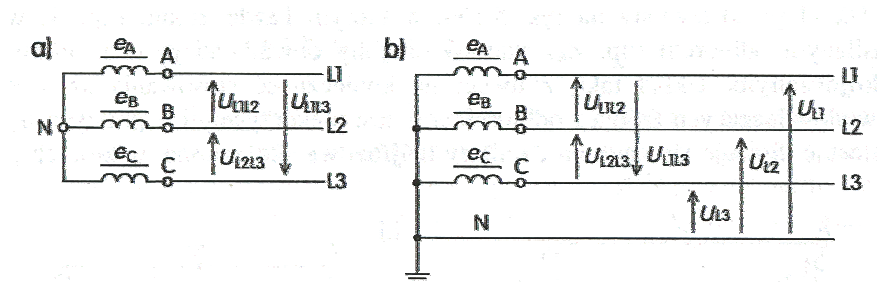
Czy potrafisz:		Tak	Nie
1)	Zdefiniować, co to jest zwarcie pomiarowe?	☐	☐
2)	wyjaśnić zasadę działania transformatora?	☐	☐
3)	omówić stany pracy transformatora?	☐	☐
4)	obliczyć napięcie zwarcia?	☐	☐
5)	omówić budowę transformatora?	☐	☐
6)	określić podstawowe parametry transformatorów?	☐	☐

4.7. Prąd przemienny trójfazowy

4.7.1. Materiał nauczania

Układem trójfazowym nazywamy zbiór trzech obwodów elektrycznych, w którym działają trzy napięcia źródłowe sinusoidalnie zmienne o jednakowej częstotliwości, przesunięte względem siebie o kąt 120° i wytwarzane w jednym źródle energii, którym najczęściej jest generator lub prądnica trójfazowa.

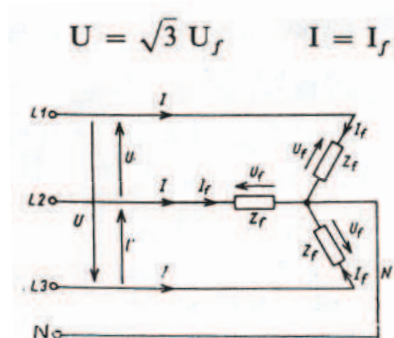
W zależności od tego czy punkt neutralny jest doprowadzony do odbiornika rozróżniamy układy: trójprzewodowy lub czteroprzewodowy.



Rys. 23. Układ trójfazowy: a) trójprzewodowy, b) czteroprzewodowy

W układach trójfazowych symetrycznych zachodzą następujące zależności:

a) połączenie w gwiazdę

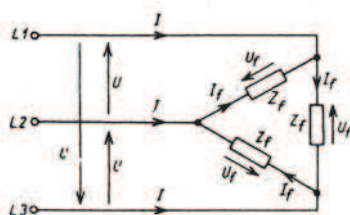


Rys. 24. Połączenie odbiorników trójfazowych w gwiazdę [4,s.39]

Na zaciskach źródła 3-fazowego skojarzonego w gwiazdę rozróżniamy napięcia:

- napięcia fazowe – U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} ; są to napięcia pomiędzy zaciskiem fazowym a punktem neutralnym,
- napięcia międzyfazowe – $U_{L12}, U_{L23}, U_{L31}$; są to napięcia występujące pomiędzy przewodami fazowymi.

b) połączenie w trójkąt



Rys. 25. Połączenie odbiorników trójfazowych w trójkąt [4,s.39]

$$U = U_f \quad I = \sqrt{3} \cdot I_f$$

gdzie: U – napięcie międzyprzewodowe (międzyfazowe),

U_f – napięcia fazowe,

I – prąd przewodowy,

I_f – prąd fazowy.

Układy odbiorników trójfazowych

W układach 3-fazowych w zależności od przeznaczenia i rodzaju odbiornika stosuje się połączenie w trójkąt i gwiazdę. Odbiorniki 3 –fazowe mogą być symetryczne i niesymetryczne.

Moc prądu trójfazowego

Moc prądu trójfazowego w układzie symetrycznym oblicza się ze wzorów:

$$\text{Moc czynna } P = 3U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi = \sqrt{3}U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$\text{Moc bierna } Q = 3U_f \cdot I_f \cdot \sin \varphi = \sqrt{3}U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$\text{Moc pozorna } S = 3U_f \cdot I_f = \sqrt{3}U \cdot I$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{tg } \varphi = \frac{Q}{P}$$

4.7.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co nazywamy układem trójfazowym?
2. Jakie napięcia występują w układzie skojarzonym w gwiazdę?
3. Jak mierzymy moc czynną w układach jednofazowych i trójfazowych?
4. Jak można łączyć źródła i odbiorniki trójfazowe ?

4.7.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Silnik klatkowy 3- fazowy ma następujące dane: $U = 400 \text{ V}$; $P_{\text{odd}} = 75 \text{ kW}$; $n = 2935 \text{ obr/min}$; $\eta = 91,5\%$; $\cos \varphi = 0,9$. Oblicz P , I i Q .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinien:

- 1) obliczyć moc P pobraną przez silnik,
- 2) skorzystać ze wzoru na moc czynną i obliczyć prąd,
- 3) obliczyć moc bierną.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- kalkulator,
- literatura uzupełniająca zgodna z punktem 6.

Ćwiczenie 2

Silnik hamulcowy 3- fazowy ma następujące dane: $U = 400 \text{ V}$; $P_{\text{odd}} = 7,5 \text{ kW}$; $I = 14 \text{ A}$;

$\eta = 87 \%$. Oblicz : P , $\cos \varphi$, Q .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) obliczyć moc pobraną,
- 2) skorzystać ze wzoru na moc czynną i obliczyć $\cos \varphi$,
- 3) obliczyć moc bierną.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- kalkulator,
- literatura uzupełniająca zgodna z punktem 6.

4.7.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) wyjaśnić co nazywamy układem trójfazowym?	☐	☐
2) obliczyć moc bierną i pozorną?	☐	☐
3) narysować układ trójfazowy symetryczny połączony w gwiazdę?	☐	☐
4) narysować układ trójfazowy symetryczny połączony w trójkąt?	☐	☐
5) podać różnice pomiędzy układem trójprzewodowym a czteroprzewodowym?	☐	☐
6) wyjaśnić, co to jest napięcie fazowe i napięcie międzyfazowe?	☐	☐

4.8. Oddziaływanie prądu przemiennego na organizm ludzki

4.8.1. Materiał nauczania

Porażenie prądem elektrycznym – efekt powstający w wyniku przepływu znacznego prądu elektrycznego przez tkanki organizmów żywych - ludzi i zwierząt.

Skutki przepływu prądu przez ciało człowieka zależą od:

- rodzaju prądu (stałego lub przemiennego),
- natężenia prądu,
- częstotliwość,
- czasu przepływu prądu przez ciało,
- drogi przepływu prądu przez ciało
- gęstości prądu,
- rezystancji ciała ludzkiego.

Minimalna niebezpieczna dla człowieka wartość prądu płynącego przez dłuższy czas wynosi:

- 30 mA prądu zmiennego
- 70 mA prądu stałego

Napięcie dotykowe jest to napięcie występujące między dwoma punktami, nie należącymi do obwodu elektrycznego, z którymi mogą się zetknąć jednocześnie ręce lub ręka i stopa człowieka.

W praktyce nie operuje się bezpiecznymi wielkościami prądów lecz bezpiecznymi wielkościami napięć U_L w danych warunkach środowiskowych.

Napięcie U_L nazywa się napięciem dotykowym bezpiecznym.

Dla prądu przemiennego (w warunkach normalnych) wartość napięcia wynosi 50V, dla prądu stałego 120 V.

Tabela 1. Objawy działania prądu przemiennego 50...60 Hz na człowieka przy przepływie na drodze ręka- ręka lub ręka - noga

Wartość skuteczna prądu mA	Objawy
0...0,5	prąd niewyczuwalny
0,6...1,6	prąd znacznie wyczuwalny (swędzenie, łaskotanie)
1,6...3,5	cierpienie dłoni i przegubów, lekkie sztywnienie nóg
3,5...15	silnie sztywnienie rąk, ból przedramion, skurcze dłoni i drżenia rąk; przy wzroście wartości prądu coraz silniejsze skurcze mięśni pleców i ramion, zaciskanie się rąk obejmujących przedmiot i niemożność samodzielnego oderwania się
15...25	nie kontrolowane skurcze, utrudniony oddech, wzrost ciśnienia krwi
25...50	bardzo silne skurcze mięśni rąk i klatki piersiowej; nieregularność pracy serca, przy dłuższym działaniu prądu w górnym zakresie - migotanie komór sercowych.
50...70	migotanie komór sercowych, porażenie mięśni oddechowych, przy dłuższym działaniu śmierć przez uduszenie
Powyżej 70	przy dłuższym działaniu prądu zwykle śmierć

Ratowanie porażonych prądem elektrycznym

Przed wszystkim należy:

- uwolnić człowieka porażonego spod napięcia,
- rozpoznać stan zagrożenia porażonego,
- zastosować najlepszą metodę ratownictwa.

Należy pamiętać, że niebezpieczne dla ratownika są:

- bezpośrednie zetknięcie gołych rąk ratownika z ciałem porażonego,
- równoczesne używanie obu rąk przy odciąganiu spod napięcia,
- mokre podłoże,
- bliskie sąsiedztwo urządzeń pod wysokim napięciem,
- brak równowagi.

4.8.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co nazywamy porażeniem elektrycznym?
2. Ile wynosi minimalna niebezpieczna dla człowieka wartość prądu przemiennego płynącego przez dłuższy czas?
3. Czemu ma zapobiegać ochrona podstawowa?
4. Jakie są skutki przepływu prądu przez organizm człowieka?

4.8.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Jaka musiałaby być najmniejsza rezystancja zastępcza obwodu, w którym nastąpiło zwarcie przy $U_f = 230V$, aby dopuszczalne napięcie dotykowe nie przekroczyło wartości $U_d = 50 V$; $R_c = 1500\Omega$?

$$\frac{R_z}{R_c} = \frac{U_f}{U_d}$$

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinienś:

- 1) zapisać proporcję rezystancji z napięciem,
- 2) wyliczyć rezystancję zastępczą.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- zeszyt,
- kalkulator ,
- literatura uzupełniająca zgodna z punktem 6.

4.8.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- | | Tak | Nie |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 1) wyjaśnić, co nazywamy porażeniem prądem elektrycznym? | ☐ | ☐ |
| 2) wymienić środki ochrony przeciwporażeniowej podstawowej? | ☐ | ☐ |
| 3) wymienić, jakie są skutki przepływu prądu przez ciało człowieka? | ☐ | ☐ |
| 4) wyliczyć bezpieczne wartości prądów i napięć dla człowieka? | ☐ | ☐ |

6. LITERATURA

1. Bolkowski S.: Elektrotechnika. WSiP, Warszawa 1995
2. Goźlińska E.: Maszyny elektryczne – ćwiczenia. WSiP, Warszawa 1998
3. Jabłoński W., Płoszajski G.: Elektrotechnika z automatyką. WSiP, Warszawa 1996
4. Orlik W.: Egzamin kwalifikacyjny elektryka. KaBe, Krosno 1999
5. Praca zbiorowa: Poradnik elektryka. WSiP, Warszawa 1995
6. Pilawski M.: Pracownia elektryczna. WSiP, Warszawa 2001