

4



ELEKTRYK

**Obliczanie i pomiary parametrów
obwodu prądu jednofazowego**



MINISTERSTWO EDUKACJI
NARODOWEJ



Teresa Birecka

Obliczanie i pomiary parametrów obwodu prądu jednofazowego 724[01].O1.04

Poradnik dla ucznia

Wydawca

**Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy
Radom 2007**

Recenzenci:

mgr Elżbieta Burlaga

mgr inż. Henryk Krystkowiak

Opracowanie redakcyjne:

mgr inż. Barbara Kapruziak

Konsultacja:

mgr inż. Ryszard Dolata

Poradnik stanowi obudowę dydaktyczną programu jednostki modułowej 724[01].O1.04 „Obliczanie i pomiary parametrów obwodu prądu jednofazowego”, zawartego w modułowym programie nauczania dla zawodu elektryk.

Wydawca

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2007

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	3
2. Wymagania wstępne	5
3. Cele kształcenia	6
4. Materiał nauczania	7
4.1. Napięcia przemienne	7
4.1.1. Materiał nauczania	7
4.1.2. Pytania sprawdzające	12
4.1.3. Ćwiczenia	12
4.1.4. Sprawdzian postępów	14
4.2. Elementy R, L, C w obwodzie prądu sinusoidalnego	15
4.2.1. Materiał nauczania	15
4.2.2. Pytania sprawdzające	17
4.2.3. Ćwiczenia	17
4.2.4. Sprawdzian postępów	19
4.3. Połączenie szeregowe elementów R, L, C	20
4.3.1. Materiał nauczania	20
4.3.2. Pytania sprawdzające	24
4.3.3. Ćwiczenia	25
4.3.4. Sprawdzian postępów	27
4.4. Połączenie równoległe elementów R, L, C	28
4.4.1. Materiał nauczania	28
4.4.2. Pytania sprawdzające	30
4.4.3. Ćwiczenia	31
4.4.4. Sprawdzian postępów	32
4.5. Moc i energia prądu sinusoidalnego. Poprawa współczynnika mocy	33
4.5.1. Materiał nauczania	33
4.5.2. Pytania sprawdzające	39
4.5.3. Ćwiczenia	39
4.5.4. Sprawdzian postępów	42
4.6. Stany nieustalone w obwodach RL i RC	43
4.6.1. Materiał nauczania	43
4.6.2. Pytania sprawdzające	49
4.6.3. Ćwiczenia	49
4.6.4. Sprawdzian postępów	52
4.7. Obwody nieliniowe	53
4.7.1. Materiał nauczania	53
4.7.2. Pytania sprawdzające	55
4.7.3. Ćwiczenia	55
4.7.4. Sprawdzian postępów	56
5. Sprawdzian osiągnięć	57
6. Literatura	63

1. WPROWADZENIE

Poradnik będzie Ci pomocny w kształtowaniu umiejętności z zakresu obliczania i pomiarów w obwodach prądu jednofazowego.

W poradniku zamieszczono:

- wymagania wstępne: wykaz umiejętności, jakie powinieneś mieć już opanowane, abyś bez problemów mógł korzystać z poradnika i realizować kształcenie w oparciu o program tej jednostki modułowej,
- cele kształcenia: wykaz umiejętności, jakie ukształtujesz podczas realizacji tej jednostki, korzystając z poradnika; ich osiągnięcie jest warunkiem koniecznym do zrozumienia i przyswojenia treści zawartych w programach następnych modułów,
- materiał nauczania: zawiera „pigułkę” wiadomości teoretycznych niezbędnych do osiągnięcia celów kształcenia zawartych w tej jednostce modułowej; materiał nauczania został podzielony na siedem części (rozdziałów), obejmujących grupy zagadnień kształtujących umiejętności, które można wyodrębnić;

Każdy rozdział zawiera:

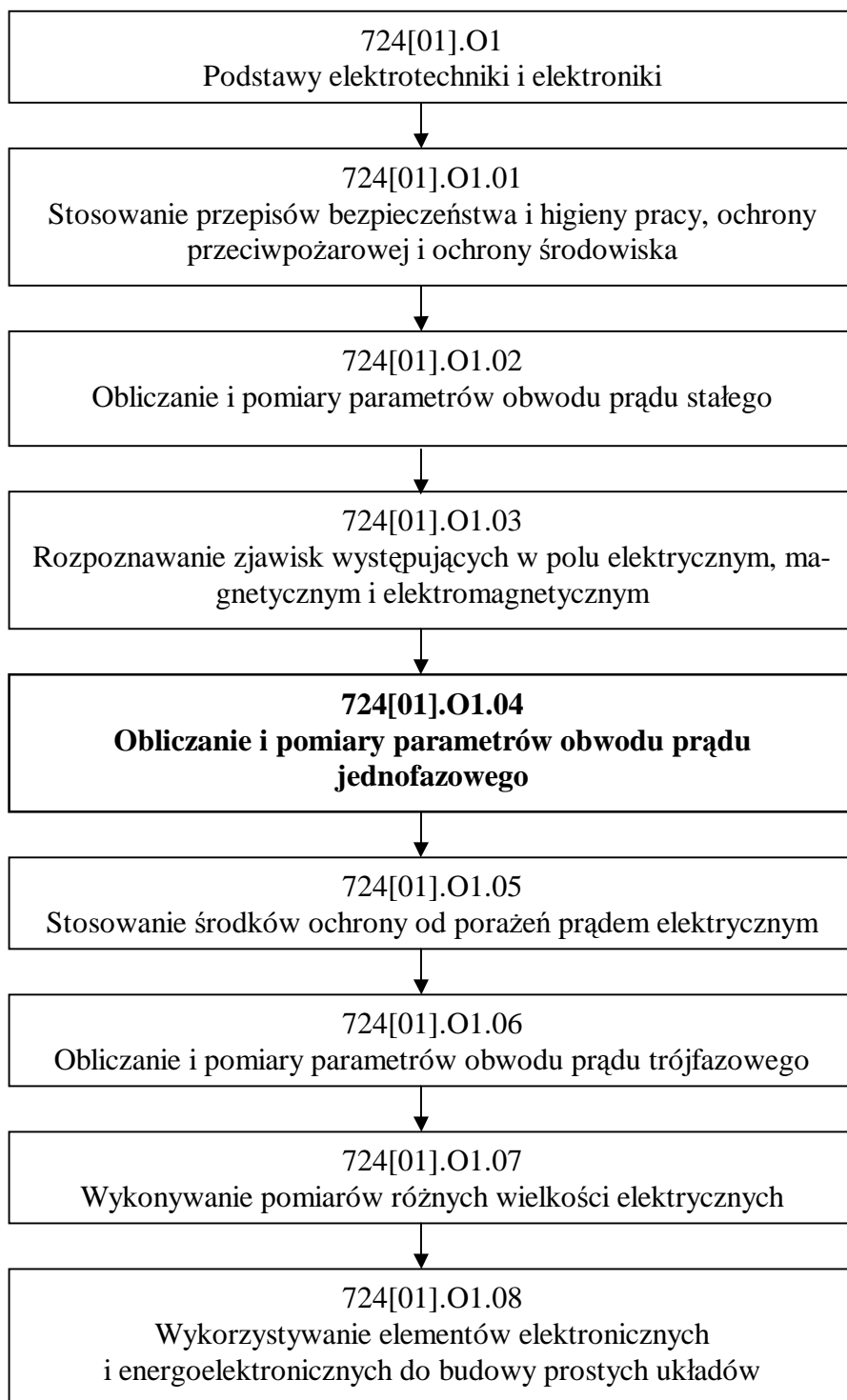
- pytania sprawdzające: zestaw pytań przydatny do sprawdzenia, czy już opanowałeś podane treści,
- ćwiczenia: pomogą Ci zweryfikować wiadomości teoretyczne oraz ukształtować umiejętności praktyczne; więcej ćwiczeń obliczeniowych znajdziesz w poz [3] ze spisu literatury, a ćwiczeń pomiarowych w poz [4 i 6],
- sprawdzian postępów: pozwoli Ci na dokonanie samooceny wiedzy po wykonaniu ćwiczeń,
- sprawdzian osiągnięć: umożliwi sprawdzenie twoich wiadomości i umiejętności, które opanowałeś podczas realizacji programu tej jednostki modułowej,
- wykaz literatury: wymieniona tutaj literatura zawiera pełne treści materiału nauczania i korzystając z niej pogłębisz wiedzę z zakresu programu jednostki modułowej; na końcu każdego rozdziału podano w nawiasie kwadratowym pozycję z wykazu literatury, którą wykorzystano przy jego opracowywaniu.

Szczególną uwagę zwróć na zależności pomiędzy prądem i napięciem dla idealnych elementów. Zależności te wykorzystasz przy rozpatrywaniu obwodów złożonych z wielu elementów oraz obwodów zawierających rzeczywiste cewki i kondensatory, które są elementami wielu odbiorników.

Postaraj się wykonać wszystkie zaproponowane ćwiczenia z należytą starannością. Wykonując ćwiczenia dotyczące obliczeń i sporządzania wykresów wektorowych zrozumiesz i utrwalisz poznane wcześniej zależności. Do wykonywania obliczeń i wykresów na podstawie przeprowadzonych pomiarów staraj się wykorzystywać programy komputerowe. W ten sposób usprawnisz sobie pracę i udoskonalisz swoje umiejętności informatyczne.

Podczas wykonywania ćwiczeń pomiarowych analizuj wyniki pomiarów. Wnioski z tej analizy pomogą Ci zdiagnozować pracę urządzeń i zlokalizować przyczyny ich uszkodzenia.

Przy wykonywaniu ćwiczeń praktycznych stosuj poznane wcześniej zasady bezpieczeństwa.



Schemat układu jednostek modułowych

2. WYMAGANIA WSTĘPNE

Przystępując do realizacji programu jednostki modułowej powinieneś umieć:

- korzystać z różnych źródeł informacji,
- rozróżniać podstawowe wielkości elektryczne i ich jednostki,
- rozpoznawać elementy elektryczne na podstawie ich symboli oraz wyglądu zewnętrznego,
- rozróżniać podstawowe pojęcia i wielkości obwodu magnetycznego i znać ich jednostki,
- charakteryzować zjawisko indukcji elektromagnetycznej i wskazać przykłady jego wykorzystania,
- rozróżniać pojęcia indukcyjności własnej i wzajemnej cewek,
- charakteryzować właściwości materiałów magnetycznych i wskazać ich zastosowania,
- stosować prawa obwodów magnetycznych do obliczania prostych obwodów elektrycznych,
- stosować działania na wektorach,
- obliczać rezystancję zastępczą obwodu,
- obliczać pojemność zastępczą układu kondensatorów,
- łączyć obwody elektryczne prądu stałego na podstawie ich schematów,
- dobierać przyrządy pomiarowe do wykonywania pomiarów w obwodach prądu stałego,
- mierzyć podstawowe wielkości elektryczne w obwodach prądu stałego,
- lokalizować i usunąć proste usterki w obwodach prądu stałego,
- stosować zasady bhp i ochrony ppoż. podczas pomiarów oraz pokazów zjawisk fizycznych.

3. CELE KSZTAŁCENIA

W wyniku realizacji programu jednostki modułowej powinieneś umieć:

- wyjaśnić zjawisko powstawania prądu sinusoidalnie zmiennego,
- rozpoznać podstawowe wielkości przebiegów sinusoidalnie zmiennych,
- obliczyć impedancję obwodu zawierającego elementy $R L C$,
- narysować wykres wektorowy prostego obwodu zawierającego elementy $R L C$,
- obliczyć prądy i napięcia w obwodach zawierających elementy $R L C$,
- obliczyć moc odbiorników prądu sinusoidalnie zmiennego,
- obliczyć pojemność kondensatorów do poprawy współczynnika mocy,
- określić warunki, w których wystąpi rezonans napięć i prądów,
- połączyć obwód elektryczny prądu przemiennego na podstawie schematu elektrycznego,
- dobrać zakres pomiarowy miernika do pomiaru wielkości elektrycznych w obwodzie prądu przemiennego,
- zmierzyć podstawowe wielkości elektryczne w obwodach jednofazowych prądu przemiennego,
- zmierzyć parametry R, L, C ,
- zlokalizować usterki w obwodzie prądu przemiennego,
- wykonać prostą naprawę w obwodzie prądu przemiennego,
- rozpoznać rodzaje przebiegów niesinusoidalnych,
- wskazać przykłady występowania stanów nieustalonych,
- wyjaśnić zjawiska występujące podczas stanów nieustalonych,
- rozpoznać obwód nieliniowy prądu przemiennego,
- opracować wyniki pomiarów,
- zastosować zasady bezpieczeństwa i higieny pracy, ochrony przeciwpożarowej i ochrony od porażen prądem elektrycznym podczas pomiarów.

4. MATERIAŁ NAUCZANIA

4.1. Napięcia przemienne

4.1.1. Materiał nauczania

Wielkości elektryczne (indukcja magnetyczna, strumień magnetyczny, siła elektromotoryczna, napięcie, prąd, moc), które zmieniają w czasie swoją wartość i kierunek (lub tylko jeden z tych parametrów) nazywamy zmiennymi.

Jeżeli te zmiany powtarzają się w pewnych określonych przedziałach czasowych (okresach), to wielkości te nazywa się okresowymi. Przebieg powtarzający się w drugiej połowie okresu co do wartości, ale zmieniający w połowie okresu swój kierunek nazywa się przemiennym.

WYTWARZANIE NAPIĘCIA SINUSOIDALNEGO

Napięcie przemienne jest to napięcie, które w czasie zmienia swoją wartość i zwrot.

Napięcie sinusoidalne jest szczególnym przypadkiem napięcia przemiennego – jego wartość w czasie zmienia się według sinusoidy.

Napięcia sinusoidalne są wytwarzane w elektrowniach przemysłowych przez generatory (prądnice).

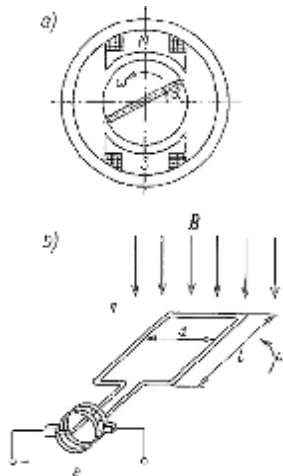
Przesyłanie i rozdział energii przy napięciu sinusoidalnym są korzystne z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego.

Powstawanie siły elektromotorycznej (napięcia źródłowego) oparte jest na zjawisku **indukcji elektromagnetycznej**: w zwoju w postaci ramki wirującym ze stałą prędkością w równomiernym polu magnetycznym indukuje się siła elektromotoryczna (napięcie źródłowe). Jej wartość w każdej chwili można wyrazić zależnością:

$$e = B_m l v \sin a$$

B_m – maksymalna wartość indukcji magnetycznej, l – długość czynna ramki, v – stała prędkość wirowania, a – kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną zwoju, a płaszczyzną przechodzącą przez oś obojętną (oś przechodzącą pośrodku między biegunami).

$B_m l v = E_m$ jest to wartość maksymalna (amplituda) siły elektromotorycznej.



Rys. 1. Zasada powstawania napięcia sinusoidalnie zmiennego: a) uproszczony model prądnicy, b) pojedynczy zwoj obracający się w równomiernym polu magnetycznym o indukcji B [1]

Warunkiem indukowania się siły elektromotorycznej w prądnicie jest ruch prętów uzwojeń względem pola magnetycznego. Nie ma znaczenia, czy porusza się magnesnica, a uzwojenie twornika jest nieruchome, czy też wiruje rozłożone równomiernie na obwodzie wirnika uzwojenie twornika, a magnesnica jest umieszczona na stojanie.

W przypadku, gdy prądnicę ma jedną parę biegunów, to magnesnica zatacza kąt pełny 2π radianów w czasie T , natomiast w dowolnym czasie t zatacza kąt a , zatem:

$$\frac{2p}{T} = \frac{a}{t}, \quad \text{stąd:} \quad a = \frac{2p}{T}t = \omega t$$

ω – **prędkość kątowna (pulsacja)**. Jednostką pulsacji jest 1 radian na sekundę (1 rad/s)

Przebieg siły elektromotorycznej w czasie opisuje zależność:

$$e = E_m \sin \omega t$$

Czas $t = 0$ jest początkiem obserwacji.

Ponieważ w chwili rozpoczęcia obserwacji ramka może znajdować się w dowolnym położeniu, przyjmujemy, że kąt odchylenia ramki dla $t = 0$ wynosi:

$$a = \omega t + y$$

a – faza przebiegu sinusoidalnego

y – faza początkowa odpowiadająca chwili $t = 0$

Zależności powyższe są słuszne dla wszystkich przebiegów sinusoidalnych, a więc prądu i napięcia także.

Napięcie sinusoidalne przy fazie początkowej różnej od zera (rys. 2) przedstawia zależność:

$$u = U_m \sin(\omega t + y)$$

U_m – amplituda napięcia [V]

T – okres przebiegu, jego jednostką jest sekunda [1s], jest to czas pełnego obrotu ramki.

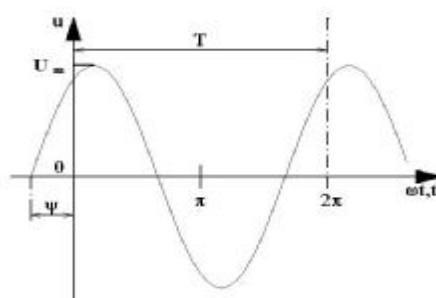
Odwrotnością okresu jest częstotliwość f :

$$f = \frac{1}{T}$$

Częstotliwość przebiegu sinusoidalnego jest to liczba okresów przypadająca na 1 sekundę. Jednostką częstotliwości jest herc [1 Hz]

W Polsce częstotliwość napięcia w sieci elektroenergetycznej wynosi 50 Hz.

Napięcia o innej częstotliwości mogą być wytwarzane przez odpowiednie generatory.



Rys. 2. Wykres czasowy napięcia sinusoidalnego [źródło własne]

Pulsację ω można wyrazić:

$$\omega = 2\pi f$$

Przy przedstawianiu przebiegów sinusoidalnych wielkości elektrycznych można na oś x nanieść podziałkę czasu (t), a także kąta (ωt).

Przy obliczaniu obwodów prądu sinusoidalnego posługujemy się pojęciem wartości skutecznej prądu i napięcia oraz pojęciem wartości średniej.

Interpretacja fizyczna wartości skutecznej prądu jest następująca:

wartością skuteczną prądu sinusoidalnego nazywamy taką wartość prądu stałego, który przepływając przez niezmienną rezystancję R w czasie odpowiadającym jednemu okresowi T , spowoduje wydzielenie się na tej rezystancji takiej samej ilości energii cieplnej, co prąd sinusoidalny w tym samym czasie.

Można dowieść, że wartość skuteczna:

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

Wartość skuteczna prądu sinusoidalnego jest równa jego amplitudzie podzielonej przez $\sqrt{2}$. Analogicznie określa się wartość skuteczną innych wielkości sinusoidalnych:

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

Do pomiaru wartości skutecznej prądów i napięć służą mierniki elektromagnetyczne, elektrodynamiczne i elektroniczne.

Wartość średnia przebiegu sinusoidalnego w całym okresie wynosi zero.

Przebiegi sinusoidalne o jednakowej pulsacji nazywamy przebiegami synchronicznymi.

Napięcie i prąd sinusoidalne w ogólnej postaci można zapisać:

$$u = U_m \sin(\omega t + \gamma_u) \quad i = I_m \sin(\omega t + \gamma_i)$$

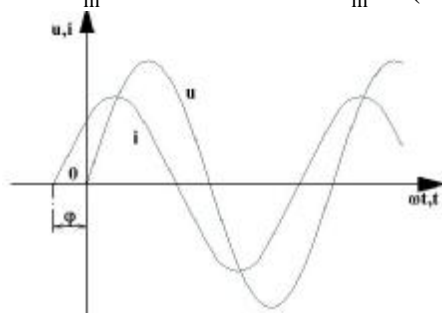
Różnicę faz początkowych dwóch wielkości sinusoidalnych nazywamy przesunięciem fazowym.

Przesunięcie fazowe między prądem, a napięciem oznaczamy literą j i obliczamy następująco:

$$j = \gamma_u - \gamma_i$$

Faza początkowa jednej z tych wielkości może być przyjęta dowolnie, ale druga już od niej zależy. Jeżeli przyjmujemy, że np. $\gamma_u = 0$, to $j = -\gamma_i$

$$u = U_m \sin \omega t \quad i = I_m \sin(\omega t + j)$$

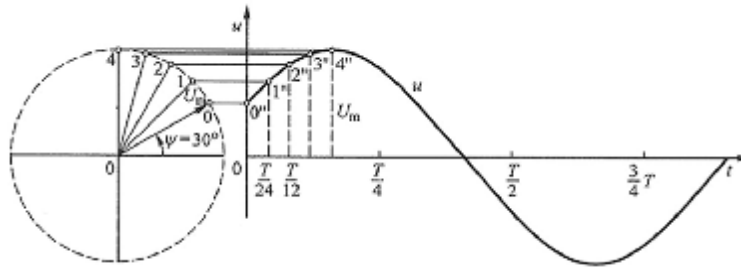


Rys. 3. Ilustracja przesunięcia fazowego prądu względem napięcia na wykresie czasowym [źródło własne]

Na rysunku 3 przedstawiono wykres czasowy prądu i napięcia.

Wielkości sinusoidalne można przedstawiać za pomocą wektorów.

Związek pomiędzy wirującym z prędkością ω wektorem o promieniu U_m , a przebiegiem sinusoidalnym przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Związek pomiędzy wektorem wirującym U_m , a przebiegiem sinusoidalnym powstałym jako rzut wektora obracającego się ze stałą prędkością kątową w [2]

Z wykresu wynika, że rzuty wektora o module równym amplitudzie przebiegu sinusoidalnego, obracającego się z prędkością kątową w , równą pulsacji tego przebiegu, na oś rzędnych odpowiadają wartościom chwilowym przebiegu.

Na tym samym wykresie wektorowym można przedstawić kilka przebiegów sinusoidalnych synchronicznych.

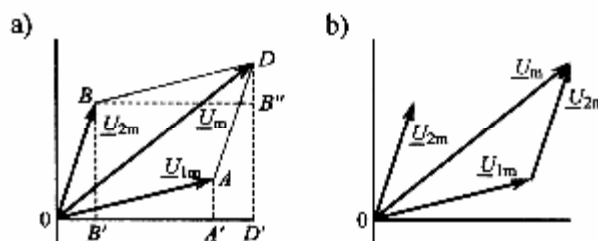
W praktyce przy obliczaniu obwodów elektrycznych bardzo przydatne jest posługiwanie się wektorami napięć (prądów). Obliczanie sprowadza się do wykonywania wykresów wektorowych, czyli poprawnego dodawania i odejmowania wektorów napięć (prądów) na elementach obwodu.

Należy pamiętać, że dodawać i odejmować można tylko te same wielkości fizyczne (dotyczy to wykonywania działań w każdej postaci, także na wartościach chwilowych)!

Na jednym wykresie wektorowym mogą być przedstawione prąd i napięcie dla tego samego obwodu, ale nie wolno ich dodawać.

Wykonując dodawanie wektorów uwzględniamy, że rzut wektora wypadkowego na dowolną oś jest równy sumie rzutów wektorów składowych na tę oś (rys. 5).

$$\underline{U}_m = \underline{U}_{1m} + \underline{U}_{2m}$$



Rys. 5. Dodawanie dwóch wielkości sinusoidalnych na wykresie wektorowym: a) metodą równoległoboku, b) bezpośrednio [2]

Przy obliczaniu obwodów prądu sinusoidalnego posługujemy się wartościami skutecznymi prądów i napięć, ponieważ takie wartości mierzą mierniki. Stąd działania na wektorach przy obliczaniu obwodów wykonujemy dla wartości skutecznych – zwrot i kierunek wektora wartości skutecznej jest taki sam jak odpowiedniego wektora amplitudy, zmienia się tylko jego długość w przyjętej skali.

Wartość skuteczna U sumy dwóch wielkości sinusoidalnych:

- o zgodnych fazach jest równa sumie algebraicznej ich wartości skutecznych:

$$U = U_1 + U_2$$

- o fazach różniących się o kąt $\pi/2$ (90°) jest równa pierwiastkowi drugiego stopnia z sumy kwadratów wartości skutecznych (stosujemy twierdzenie Pitagorasa do obliczenia sumy wektorów):

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

- o fazach przeciwnych (będących w przeciwfazie) jest równa różnicy arytmetycznej wartości skutecznych:

$$U = U_1 - U_2$$

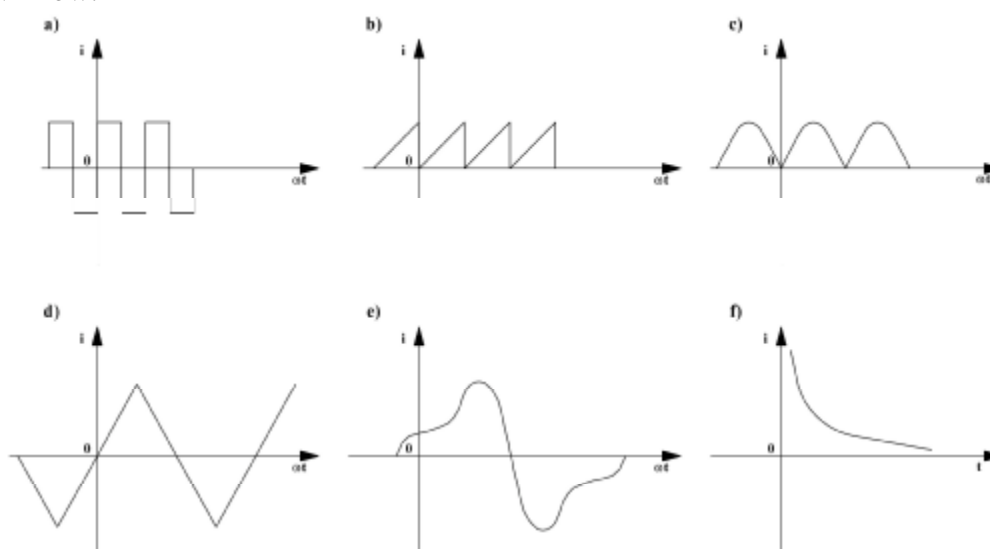
Suma kilku przebiegów sinusoidalnych o pulsacji ω jest wielkością sinusoidalną o tej samej pulsacji.

PRZEBIEGI NIESINUSOIDALNE

Przebiegi niesinusoidalne (odkształcone), to wielkości elektryczne (np. prąd, napięcie), których wartość w czasie nie zmienia się sinusoidalnie. Przykłady takich przebiegów pokazano na rysunku 6.

Mogą one być uzyskiwane w sposób zamierzony (w elektronice sygnały cyfrowe mogą przyjmować tylko pewne ustalone poziomy) lub być np. skutkiem właściwości elementów obwodu.

Napięcia odkształcone w sposób zamierzony uzyskuje się na wyjściu generatorów i prostowników.



Rys. 6. Przykłady przebiegów odkształconych [na podstawie 1]

Przebiegi niesinusoidalne, będące skutkiem właściwości elementów obwodu powstają w obwodach zawierających elementy nieliniowe. Cechą charakterystyczną obwodów nieliniowych jest to, że napięcie sinusoidalne powoduje przepływ prądu niesinusoidalnego (np. w obwodzie zawierającym cewkę z rdzeniem ferromagnetycznym) i odwrotnie: przy przepływie prądu sinusoidalnego napięcia są niesinusoidalne.

Przebiegi zmienne odkształcone mogą być:

- okresowe (rys.: 6a, 6b, 6c, 6d, 6e),
- nieokresowe (rys. 6f).

Przebiegi okresowe można podzielić na:

- przemienne, charakteryzujące się tym, że ich wartość średnia całookresowa jest równa zero (rys.: 6a, 6d, 6e),
- jednokierunkowe (rys. 6b i 6c).

Rysunek 6c przedstawia przebieg sinusoidalny wyprostowany całofalowo. Dla prądu i napięcia sinusoidalnego wyprostowanego całofalowo określa się tzw. wartość średnią półokresową:

$$I_{\text{sr}} = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,637 I_m \qquad U_{\text{sr}} = \frac{2}{\pi} U_m \approx 0,637 U_m$$

Praktycznie nigdy nie udaje się uzyskać sinusoidalnego rozkładu indukcji w szczelinie prądnicy, w związku z tym siły elektromotoryczne wytwarzane przez prądnicę trójfazową (generator synchroniczny) też nie są sinusoidalne. Powoduje to przepływ niesinusoidalnych prądów w odbiornikach liniowych zasilanych z sieci energetycznej.

Na pogorszenie parametrów napięcia w sieci ma też wpływ dołączanie do niej dużych odbiorników powodujących zniekształcenie napięcia sieciowego.

Zniekształcenie napięcia sieciowego powodowane przez odbiorniki nieliniowe zakłóca pracę innych odbiorników, a także powoduje powstawanie dodatkowych strat mocy.

Przy znikomym odkształceniu okresowych wielkości niesinusoidalnych można przyjąć, że prądy i napięcia w obwodach są sinusoidalne.

Przy znacznych odkształceniach należy uwzględnić wpływ odkształcenia napięć i prądów na pracę obwodu.

Do obserwacji i pomiaru napięcia, prądu (pośrednio), częstotliwości, amplitudy oraz przesunięcia fazowego przebiegów sinusoidalnych bardzo dogodnym przyrządem jest oscyloskop. Jego budowę i zasadę działania oraz sposób pomiarów przedstawiono dokładnie w pozycji 3 literatury [1, 2]

4.1.2. Pytania sprawdzające

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

1. Na czym polega zjawisko indukcji elektromagnetycznej i jakie ma zastosowanie?
2. Jakie wielkości charakteryzują przebieg sinusoidalny?
3. Jakie przebiegi nazywamy synchronicznymi?
4. Jak obliczamy przesunięcie fazowe między prądem i napięciem?
5. Jak obliczamy wartość skuteczną prądu sinusoidalnego? Jaka jest jej interpretacja fizyczna?
6. Co to jest wykres wektorowy, a co czasowy?
7. Jak obliczamy częstotliwość, okres przebiegu sinusoidalnego na podstawie zapisu na wartość chwilową?
8. Jak obliczamy wartość skuteczną sumy (różnicy) przebiegów będących w fazie?
9. Jak obliczamy wartość skuteczną sumy (różnicy) przebiegów przesuniętych w fazie o 90° ?
10. Jak definiujemy pojęcie „przebieg odkształcony”?
11. Co może być przyczyną odkształcenia prądu, napięcia?

4.1.3. Ćwiczenia

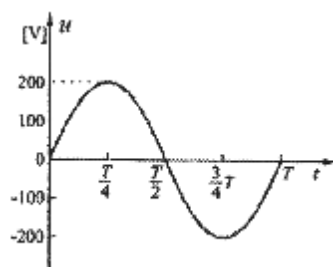
Ćwiczenie 1

Oblicz wartość skuteczną napięcia i częstotliwość na podstawie przebiegu czasowego tego napięcia przedstawionego na rysunku. Okres $T = 20$ ms.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) określić amplitudę U_m napięcia,
- 2) obliczyć wartość skuteczną U i częstotliwość f napięcia,
- 3) ocenić poprawność wykonania ćwiczenia.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- rysunek przedstawiający przebieg sinusoidalny z naniesioną podziałką,
- kalkulator.

Ćwiczenie 2

Oblicz częstotliwość i wartość skuteczną prądu sinusoidalnego: $i = 4,23 \sin(628t + \frac{P}{2})$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) określić amplitudę I_m , pulsację ω i fazę początkową γ prądu na podstawie zależności na wartość chwilową,
- 2) obliczyć częstotliwość f , okres T i wartość skuteczną prądu I ,
- 3) ocenić jakość wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- kalkulator.

Ćwiczenie 3

Oblicz, posługując się rachunkiem wektorowym, wartość skuteczną sumy dwóch napięć o amplitudach: $U_{m1} = 60 \text{ V}$ i $U_{m2} = 40 \text{ V}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

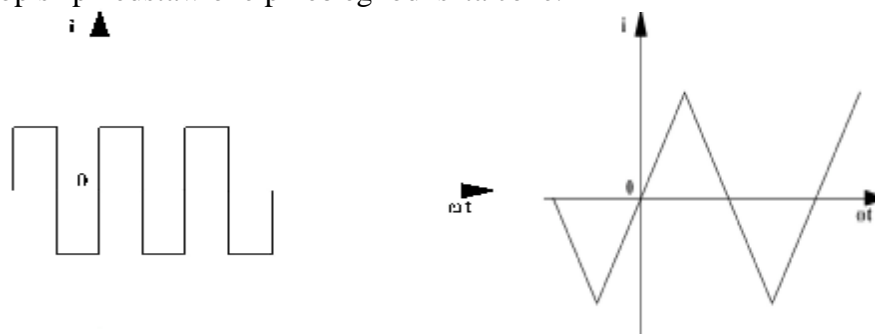
- 1) obliczyć wartości skuteczne napięć,
- 2) przyjąć skalę dla wektorów napięć: $10 \text{ V} \rightarrow 1 \text{ cm}$,
- 3) wykonać dodawanie wektorów i określić sumę dla dwóch przypadków:
 - napięcia są w fazie,
 - napięcia są przesunięte względem siebie o kąt 90° ,
- 4) dla obu przypadków obliczyć algebraicznie sumę napięć (dla napięć przesuniętych o kąt 90° skorzystać z twierdzenia Pitagorasa),
- 5) porównać i ocenić wyniki, sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- kalkulator,
- linijka,
- zeszyt do ćwiczeń.

Ćwiczenie 4

Nazwij i opisz przedstawione przebiegi odkształcone.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Sposób wykonania ćwiczenia:

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) przypisać nazwę do określonego przebiegu, przedstawionego na foliogramie lub na ekranie oscyloskopu,
- 2) określić, czy przebieg jest okresowy,
- 3) przerysować przebiegi do zeszytu i opisać je.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- foliogramy z przebiegami odkształconymi,
- generator,
- oscyloskop,
- zeszyt do ćwiczeń.

4.1.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- | | Tak | Nie |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 1) scharakteryzować zjawisko indukcji elektromagnetycznej? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2) wskazać przykłady wykorzystania zjawiska indukcji elektromagnetycznej? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3) określić parametry przebiegu sinusoidalnego na podstawie jego wykresu czasowego i zapisu matematycznego? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4) obliczyć okres, częstotliwość, pulsację? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5) narysować wykres czasowy i wektorowy wielkości sinusoidalnej? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6) obliczyć wartość skuteczną wielkości sinusoidalnej? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7) nazwać przebieg odkształcony ze względu na jego kształt? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8) rozpoznać przebiegi przemienne, okresowe, jednokierunkowe? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

4.2. Elementy R, L, C w obwodzie prądu sinusoidalnego

4.2.1. Materiał nauczania

Rezystory, cewki i kondensatory nazywamy elementami idealnymi R, L i C , jeżeli każdy z nich zawiera tylko jeden parametr (odpowiednio: rezystancję, indukcyjność, pojemność).

W elementach rzeczywistych należy uwzględniać pozostałe parametry: pojemność i (lub) indukcyjność występujące w rezystorze, rezystancję cewki (jest nawinięta z drutu nawojowego o określonej rezystywności), rezystancję upływową dielektryka w kondensatorze.

Elementy, których parametry (np. R, L, C) nie zależą od napięcia nazywamy liniowymi. Ich charakterystyka $I = f(U)$ jest linią prostą i przechodzi przez początek układu współrzędnych.

W tym rozdziale będą omawiane elementy idealne, liniowe.

Elementy R, L i C są elementami pasywnymi. Stanowią elementy odbiorcze w obwodzie. Ze względu na sposób wykonania nazywamy je dwójnikami (mają dwa zaciski).

Przy obliczaniu prądu w dwójniku korzystamy z prawa Ohma, które jest spełnione zarówno w odniesieniu do wartości chwilowych, amplitud, jak i do wartości skutecznych.

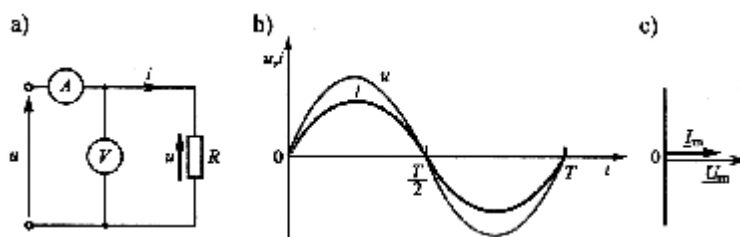
Przy badaniu obwodów prądu sinusoidalnego należy zapoznać się z parametrami elementów (odbiornika), aby nie przekroczyć dopuszczalnego napięcia lub prądu i odpowiednio dobrać zakresy mierników. Do pomiaru napięć i prądów można używać mierników o ustroju elektromagnetycznym, elektrodynamicznym, mierników uniwersalnych oscyloskopu. Napięcie w obwodzie prądu sinusoidalnego można regulować za pomocą autotransformatora.

Rezystor zasilany napięciem sinusoidalnym

Jeżeli rezystor idealny o rezystancji R zasilimy napięciem sinusoidalnym (rys. 7):

$$u = U_m \sin \omega t,$$

to w obwodzie popłynie prąd:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$$


Rys. 7. Rezystor zasilany napięciem sinusoidalnym: a) schemat obwodu b) wykres czasowy napięcia i prądu c) wykres wektorowy [2]

Amplituda prądu:
$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

Wartość skuteczna prądu:
$$I = \frac{U}{R}$$

Dla idealnego rezystora napięcie i prąd są w fazie: $j = j_u - j_i = 0$

Cewka o indukcyjności L w obwodzie prądu sinusoidalnego

Jeżeli przez idealną cewkę o indukcyjności L (rys. 8) płynie prąd sinusoidalny:

$$i = I_m \sin \omega t,$$

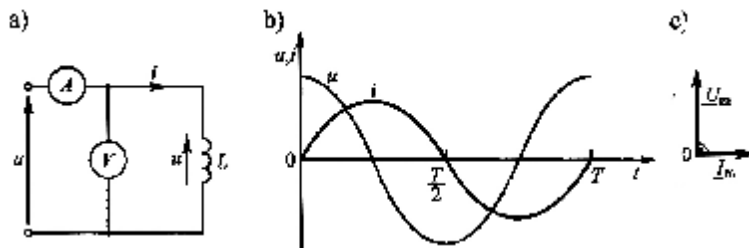
to napięcie na jej zaciskach wynosi: $u = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + \frac{P}{2}),$

Amplituda napięcia: $U_m = \omega L I_m$

Wartość skuteczna napięcia: $U = \omega L I$

Oznaczamy:

$X_L = \omega L = 2\pi f L$ – reaktancja indukcyjna; jej jednostką jest 1Ω .



Rys. 8. Cewka idealna w obwodzie prądu sinusoidalnego; a) schemat obwodu, b) wykres czasowy napięcia i prądu, c) wykres wektorowy [2]

W obwodzie z cewką idealną napięcie wyprzedza prąd o kąt fazowy $\varphi = \frac{P}{2}$ (90°).

Wartość skuteczną prądu w obwodzie z cewką idealną obliczamy z zależności:

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi f L}$$

Reaktancja indukcyjna jest wprost proporcjonalna do częstotliwości f .

Oznacza to, że jeżeli $f \rightarrow \infty$, to reaktancja indukcyjna również dąży do nieskończoności, a dla $f = 0$ (prąd stały) reaktancja $X_L = 0$, co można interpretować następująco:

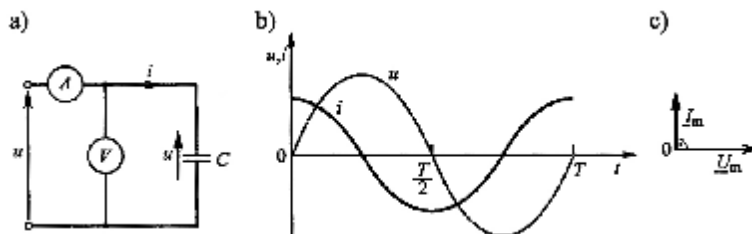
w obwodzie prądu stałego idealna cewka stanowi zwarcie.

Kondensator zasilany napięciem sinusoidalnym

Jeżeli do idealnego kondensatora o pojemności C (rys. 9) przyłożymy napięcie sinusoidalne:

$$u = U_m \sin \omega t,$$

to w obwodzie popłynie prąd: $i = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{P}{2})$



Rys. 9. Kondensator zasilany napięciem sinusoidalnym: a) schemat obwodu, b) wykres czasowy napięcia i prądu, c) wykres wektorowy dla amplitud [2]

W obwodzie z idealnym kondensatorem napięcie opóźnia się względem prądu o kąt fazowy $j = -\frac{p}{2}$ (-90°). Prąd wyprzedza napięcie o $\pi/2$.

Wartość maksymalna prądu: $I_m = \omega C U_m$

Wartość skuteczna prądu: $I = \omega C U$

Wielkość $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ - reaktancja pojemnościowa. Jej jednostką jest 1 om (1Ω).

Prawo Ohma dla obwodu zawierającego idealny kondensator przyjmuje postać:

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

Reaktancja pojemnościowa X_C jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości f .

Oznacza to, że:

- w obwodzie prądu stałego ($f = 0$) idealny kondensator stanowi przerwę,
- przy nieskończonej dużej częstotliwości prądu ($f \rightarrow \infty$) idealny kondensator powoduje zwarcie.

Pomiar pojemności kondensatora metodą techniczną

Przy założeniu, że rezystancja dielektryka kondensatora jest nieskończenie duża (kondensator idealny), sposób postępowania przy tej metodzie jest następujący:

- włączamy kondensator w obwód napięcia przemiennego (jak na rysunku 8a) o znanej częstotliwości,
- mierzymy prąd i napięcie,
- z prawa Ohma wyznaczamy reaktancję kondensatora: $X_C = \frac{U}{I}$,
- wykorzystujemy zależność: $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ i obliczamy pojemność $C = \frac{1}{2\pi f X_C}$.

4.2.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jaki element nazywamy idealnym?
2. Jak obliczamy wartość skuteczną prądu sinusoidalnego płynącego przez rezystor idealny? Czy ten prąd zależy od częstotliwości napięcia zasilającego?
3. Jaką zależnością określamy reaktancję indukcyjną, pojemnościową? Jaka jest jej jednostka?
4. Jak obliczamy wartość skuteczną prądu w obwodzie z idealną cewką, kondensatorem?
5. Jakie jest przesunięcie fazowe między napięciem a prądem w obwodzie z idealnym kondensatorem, z idealną cewką?
6. Jak można zmierzyć pojemność kondensatora metodą techniczną?

4.2.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz wartość skuteczną napięcia, jakim zasilana jest idealna cewka o indukcyjności $L = 10 \text{ mH}$, jeżeli płynie przez nią prąd $i = 10 \sin(314t - \frac{p}{2}) \text{ A}$. Dla wartości skutecznych prądu i napięcia narysuj wykres wektorowy w przyjętej skali.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) obliczyć wartość skuteczną I prądu oraz jego częstotliwość f ,
- 2) obliczyć reaktancję indukcyjną X_L ,
- 3) obliczyć wartość skuteczną U napięcia,
- 4) przyjąć skalę dla napięcia i skalę dla prądu i narysować wykres wektorowy,
- 5) ocenić poprawność wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- przybory do rysowania, papier milimetrowy,
- kalkulator.

Ćwiczenie 2

Zmierz pojemność kondensatora metodą techniczną.

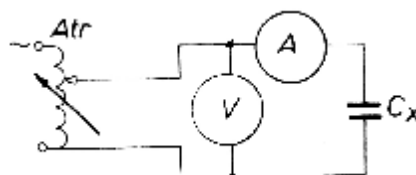
Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zmontować układ pomiarowy według schematu,
- 2) przedstawić nauczycielowi układ pomiarowy do sprawdzenia,
- 3) odczytać i zanotować wartości wskazane przez mierniki,
- 4) obliczyć reaktancję pojemnościową X_C ,
- 5) obliczyć pojemność C kondensatora,
- 6) ocenić, jak by się zmienił prąd w obwodzie, gdyby częstotliwość napięcia wzrosła dwukrotnie,
- 7) ocenić poprawność wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat układu pomiarowego,



Rysunek do ćwiczenia [6]

- kondensator,
- autotransformator,
- woltomierz i amperomierz elektromagnetyczne,
- kalkulator.

4.2.4. Sprawdźan postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) określić zależność między wartościami chwilowymi prądu i napięcia dla idealnych elementów R , L i C ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) narysować wykres czasowy i wektorowy napięcia i prądu dla dwójników zawierających R , L lub C ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) obliczyć reaktancję pojemnościową i indukcyjną?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) zastosować prawo Ohma dla wartości skutecznych i amplitud w obwodzie zawierającym idealny element R , L lub C ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) zanalizować wpływ zmian częstotliwości na wartość prądu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) zmierzyć pojemność idealnego kondensatora metodą techniczną?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

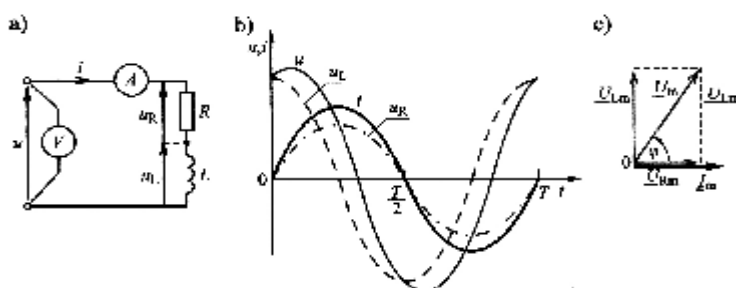
4.3. Połączenie szeregowe elementów R , L , C

4.3.1. Materiał nauczania

Przy obliczaniu i w pomiarach obwodów składających się z szeregowo połączonych elementów R , L , C wykorzystujemy prawo Ohma (słuszne dla wartości chwilowych, skutecznych, amplitud prądu i napięcia) oraz II prawo Kirchhoffa (słuszne dla wartości chwilowych napięć oraz dla wektorów napięć w obwodzie).

Szeregowe połączenie R i L

Szeregowe połączenie R i L to zarówno połączenie idealnego rezystora z idealną cewką, jak też schemat zastępczy rzeczywistej cewki o indukcyjności L i rezystancji R (rys. 10).



Rys. 10. Gałąź szeregowo R i L zasilana napięciem sinusoidalnym: a) schemat dwójnika, b) wykres czasowy napięć i prądu, c) wykres wektorowy napięć [2]

W tym obwodzie: $u = u_R + u_L$

Jeżeli: $i = I_m \sin \omega t$, to: $u = U_m \sin(\omega t + j)$

j – kąt przesunięcia fazowego: $j = j_u - j_i$

Dodawaniu wartości chwilowych napięć zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa odpowiada dodawanie geometryczne wektorów odwzorowujących te napięcia.

Dla wartości skutecznych: $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L$

Moduł napięcia (napięcie, które wskaże woltomierz) ma wartość:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2} I$$

Oznaczamy: $\sqrt{R^2 + X_L^2} = Z$

Z – **impedancja** dwójnika szeregowego RL ; jednostką impedancji jest 1Ω .

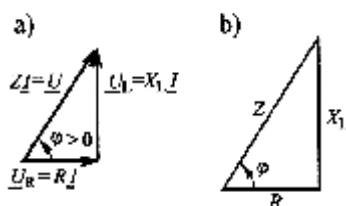
Prawo Ohma dla dwójnika RL zasilanego napięciem sinusoidalnym:

$$U = ZI$$

Napięcia na elementach obwodu szeregowego obliczamy z prawa Ohma, czyli:

$$U_R = RI, \quad U_L = X_L I$$

Po podzieleniu boków trójkąta napięć przez prąd I otrzymujemy trójkąt impedancji o bokach: R , X_L , Z , który jest trójkątem podobnym do trójkąta napięć (rys. 11).



Rys. 11. Trójkąty: a) napięć, b) impedancji dla szeregowego połączenia R i L [2]

Wynika z niego, że : $R = Z \cos j$, $X_L = Z \sin j$, $\cos j = \frac{R}{Z}$;

Kąt j dla dwójnika RL jest dodatni zawarty w przedziale $0 \leq j \leq \frac{\pi}{2}$.

Dla rzeczywistej cewki można określić parametr zwany dobrocią Q - jest to zdolność cewki do gromadzenia energii:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Zależności występujące w szeregowym połączeniu R i L można wykorzystać praktycznie do wyznaczenia indukcyjności cewki metodą techniczną.

Pomiar indukcyjności cewki rzeczywistej metodą techniczną

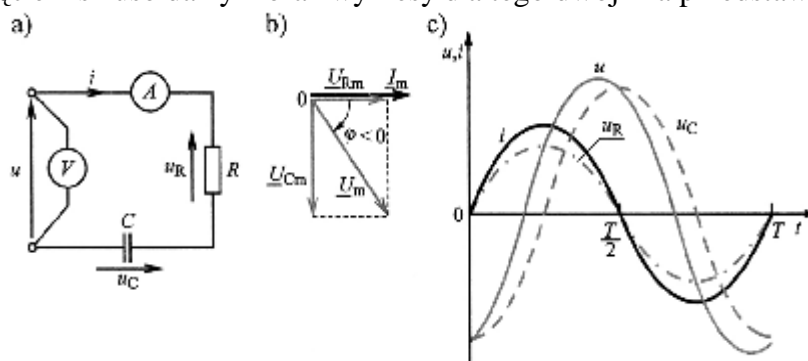
Sposób postępowania przy tej metodzie jest następujący:

- włączamy cewkę w obwód napięcia stałego, mierzymy prąd i napięcie i z prawa Ohma wyznaczamy rezystancję cewki: $R = \frac{U}{I}$,
- włączamy cewkę w obwód napięcia przemiennego o znanej częstotliwości, mierzymy prąd, napięcie i z prawa Ohma wyznaczamy impedancję cewki: $Z = \frac{U}{I}$,
- z zależności: $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ wyznaczamy reaktancję cewki: $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$,
- wykorzystujemy zależność: $X_L = 2\pi fL$ i obliczamy indukcyjność cewki: $L = \frac{X_L}{2\pi f}$

Dla rzeczywistej cewki możemy sporządzić wykresy wektorowe oraz trójkąty impedancji i mocy jak dla dwójnika składającego się z idealnych elementów R i L .

Szeregowe połączenie R i C

Szeregowe połączenie rezystora o rezystancji R i kondensatora o pojemności C zasilanych napięciem sinusoidalnym oraz wykresy dla tego dwójnika przedstawia rys. 12.



Rys. 12. Gałąź szeregową RC : a) schemat dwójnika, b) wykres wektorowy, c) wykres czasowy napięć i prądu [2]

W tym obwodzie:

$$u = u_R + u_C$$

Jeżeli : $i = I_m \sin \omega t$, to : $u = U_m \sin(\omega t + j)$.

Dla wartości skutecznych: $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C$

$$\text{oraz: } U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = \sqrt{R^2 + X_C^2} I$$

Oznaczamy: $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

Z – impedancja dwójnika szeregowego RC ; jednostką impedancji jest 1 om (1Ω).

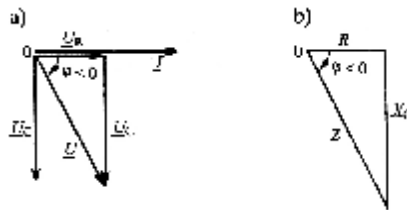
j – kąt przesunięcia fazowego: $j = j_u - j_i$

Prawo Ohma dla dwójnika RC zasilanego napięciem sinusoidalnym:

$$U = ZI$$

Moduły napięć są proporcjonalne do prądu, czyli: $U_R = RI$, $U_C = X_C I$, $U = ZI$. Trójkąt impedancji o bokach R , X_C , Z jest trójkątem podobnym do trójkąta napięć (rys. 13). Wynika z niego, że :

$$R = Z \cos j, \quad X_C = -Z \sin j, \quad \cos j = \frac{R}{Z}; \quad \sin j = -\frac{X_C}{Z};$$

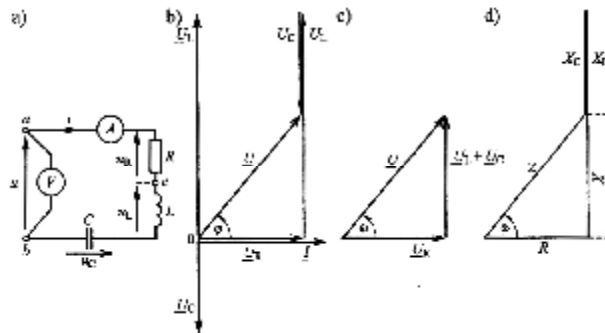


Rys. 13. Trójkąty: a) napięć, b) impedancji dla szeregowego połączenia R i C [2]

Kąt j dla dwójnika RC jest ujemny, zawarty w przedziale $-\frac{\pi}{2} \leq j \leq 0$.

Szeregowe połączenie R , L , C

W szeregowym obwodzie RLC (rys. 14) można zastosować II prawo Kirchhoffa dla wartości chwilowych lub wektorów napięć



Rys. 14. Szeregowa gałąź R , L , C : a) schemat układu, b) wykres wektorowy dla $X_L > X_C$, c) trójkąt napięć, d) trójkąt impedancji [w oparciu o 2]

W tym obwodzie:

$$u = u_R + u_L + u_C$$

Jeżeli: $i = I_m \sin \omega t$, to: $u = U_m \sin(\omega t + j)$,

j – kąt przesunięcia fazowego: $j = j_u - j_i$

Dla wartości skutecznych: $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C$

$$\text{oraz: } U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} I$$

$$\text{Oznaczamy: } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Z – impedancja dwójnika szeregowego RLC ; jednostką impedancji jest 1 Ω .

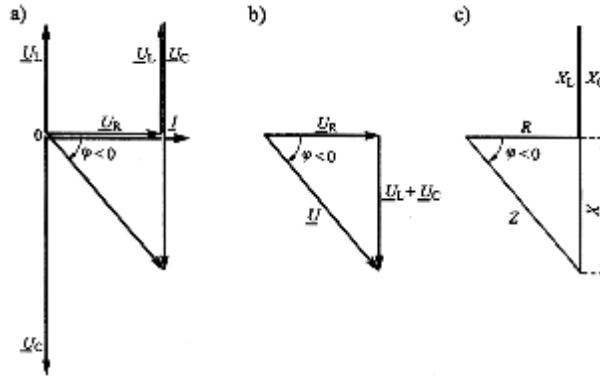
$X = X_L - X_C$ - reaktancja gałęzi RLC

Prawo Ohma dla gałęzi szeregowo połączonych RLC , zasilanej napięciem sinusoidalnym:

$$U = ZI$$

Kąt przesunięcia fazowego: $j = j_u - j_i$ dla dwójnika RLC jest zawarty w przedziale:

$$-\frac{P}{2} \leq j \leq \frac{P}{2}.$$



Rys. 15. Wykresy dla układu szeregowej gałęzi R, L, C dla $X_L < X_C$: a) wykres wektorowy b) trójkąt napięć, c) trójkąt impedancji [2]

Jeżeli:

$X > 0$ (gdy $X_L > X_C$) – to kąt j jest dodatni – obwód ma charakter indukcyjny,

$X < 0$ (gdy $X_L < X_C$) – to kąt j jest ujemny – obwód ma charakter pojemnościowy,

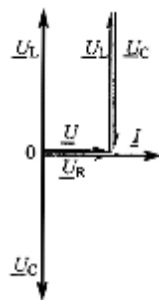
$X = 0$ (gdy $X_L = X_C$) – to kąt j jest równy zero – obwód ma charakter rezystancyjny, w obwodzie zachodzi rezonans.

Rezonans w tym obwodzie nazywamy rezonansem napięć lub rezonansem szeregowym.

$$X = X_L - X_C = 0, \quad X_L = X_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$$



Rys. 16. Wykres napięć dla układu szeregowego R, L, C : dla $X_L = X_C$ - układ w stanie rezonansu.[2]

Częstotliwość przy której zachodzi rezonans w obwodzie nazywamy częstotliwością rezonansową:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

W stanie rezonansu napięć:

$$X_L = X_C, \quad U_L = U_C, \quad U = U_R, \quad I = \frac{U}{R}, \quad j = 0.$$

- reaktancja pojemnościowa jest równa reaktancji indukcyjnej; reaktancja wypadkowa układu jest równa zero,
- impedancja obwodu jest równa rezystancji, przesunięcie fazowe jest równe zero,
- napięcie na indukcyjności jest równe napięciu na pojemności, a suma wektorów tych napięć jest równa zero (całkowita kompensacja napięć),
- prąd w obwodzie osiąga największą wartość, jest ograniczony tylko rezystancją obwodu.

W stanie rezonansu napięcie prąd w obwodzie może osiągać bardzo duże wartości – przy małej rezystancji R źródło pracuje w warunkach zbliżonych do zwarcia.

Napięcia na elementach L i C mogą osiągać znaczne wartości, dużo większe od napięcia zasilającego. Zjawisko to nazywamy przepięciem. Przepięcia są zjawiskiem niekorzystnym w obwodach elektroenergetycznych.

Dla obwodu rezonansowego szeregowego można określić dobroć obwodu Q :

$$Q = \frac{U_L}{U_R} = \frac{X_L}{R}$$

Układy rezonansowe są wykorzystywane m.in. w filtrach częstotliwościowych, urządzeniach pomiarowych.

Badanie obwodów RLC

Badając obwody RLC możemy na podstawie pomiarów określić rozkład napięć na poszczególnych elementach połączonych szeregowo lub rozływ prądów w połączeniach równoległych. Za pomocą pomiarów można również wyznaczyć częstotliwość rezonansową obwodu.

Parametry obwodów R , L , C można wyznaczyć pośrednio, mierząc prąd, napięcie, częstotliwość i wykorzystując zależności zachodzące w tych obwodach.

W przypadku braku prądu po podaniu napięcia do obwodu należy przypuszczać, że w obwodzie wystąpiła przerwa. Należy wówczas w stanie beznapięciowym zlokalizować przerwę za pomocą omomierza lub zachowując środki ostrożności sprawdzać układ woltomierzem przy włączonym napięciu [1, 2, 4, 5, 6]

4.3.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jakie wartości może przyjmować kąt przesunięcia fazowego j w dwójniku szeregowym RL , a jakie w RC ?
2. Jak obliczamy impedancję dwójnika szeregowego RL ? Jaka jest jej jednostka?
3. Jak obliczamy wartość skuteczną prądu sinusoidalnego płynącego przez dwójnik szeregowy RL ? Czy ten prąd zależy od częstotliwości napięcia zasilającego?
4. Jak obliczamy impedancję dwójnika szeregowego RC ? Jaka jest jej jednostka?
5. Jak obliczamy wartość skuteczną prądu sinusoidalnego płynącego przez dwójnik szeregowy RC ? Czy ten prąd zależy od częstotliwości napięcia zasilającego?
6. Jakie wartości może przyjmować kąt przesunięcia fazowego j w dwójniku szeregowym RLC ?
7. Jak obliczamy impedancję dwójnika szeregowego RLC ?
8. Jak obliczamy wartość skuteczną prądu sinusoidalnego płynącego przez dwójnik szeregowy RLC ? Czy ten prąd zależy od częstotliwości napięcia zasilającego?
9. Na czym polega metoda techniczna pomiaru indukcyjności cewki?

4.3.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz wartość prądu płynącego przez rzeczywistą cewkę o rezystancji $R = 7 \Omega$ i indukcyjności $L = 31,9 \text{ mH}$, do której końców doprowadzono napięcie sinusoidalne o wartości skutecznej $U = 50 \text{ V}$ i częstotliwości $f = 50 \text{ Hz}$. Narysuj trójkąt napięć i trójkąt impedancji dla tego obwodu. Cewkę traktujemy jako szeregowe połączenie R i L .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) obliczyć reaktancję X_L i impedancję Z cewki,
- 2) obliczyć prąd płynący przez cewkę,
- 3) obliczyć składowe U_R i U_L napięcia,
- 4) przyjąć skalę dla wykresów: $10 \text{ V} \rightarrow 1 \text{ cm}$, $1 \text{ A} \rightarrow 1 \text{ cm}$, $2 \Omega \rightarrow 1 \text{ cm}$; narysować wykres wektorowy i trójkąt impedancji,
- 5) ocenić jakość wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- przybory do rysowania, papier milimetry, kalkulator.

Ćwiczenie 2

Oblicz wartość napięcia zasilającego układ szeregowo połączonych: rezystora o rezystancji $R = 600 \Omega$ i kondensatora o pojemności $C = 4 \mu\text{F}$, jeżeli wartość skuteczna prądu płynącego w tym obwodzie wynosi $I = 200 \text{ mA}$, a jego częstotliwość $f = 50 \text{ Hz}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować dwójnik RC i oznaczyć napięcia i prąd,
- 2) obliczyć wielkości niezbędne do narysowania trójkąta impedancji i wykresu wektorowego,
- 3) narysować dla tego dwójnika wykres wektorowy i trójkąt impedancji,
- 4) obliczyć napięcie U zasilające układ,
- 5) porównać wartość napięcia zasilania: obliczoną oraz uzyskaną wykreślnie,
- 6) sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- przybory do rysowania, papier milimetry, kalkulator.

Ćwiczenie 3

Pomiar indukcyjności rzeczywistej cewki metodą techniczną.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z przewodnim tekstem do ćwiczenia, otrzymanym od nauczyciela,
- 2) wykonać ćwiczenie według przewodniego tekstu.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- urządzenia i mierniki wskazane przez ucznia,
- poradnik dla ucznia, literatura [2, 6],
- komputer z programem graficznym i arkuszem kalkulacyjnym.

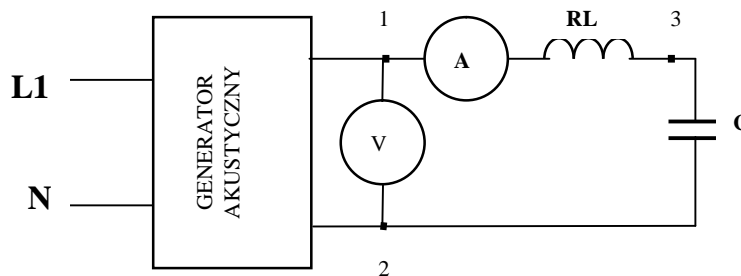
Ćwiczenie 4

Na podstawie pomiarów określ częstotliwość rezonansową w układzie szeregowo połączonej rzeczywistej cewki z kondensatorem.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) połączyć układ według schematu,
- 2) przyłączyć wyjścia oscyloskopu do punktów 1 i 3 oraz 2 i 3,
- 3) nastawić napięcie zasilania z generatora napięć sinusoidalnych i utrzymywać stałą wartość tego napięcia,
- 4) regulować częstotliwość f napięcia zasilania (w zakresie wskazanym przez nauczyciela), obserwując jednocześnie wskazanie amperomierza i przebiegi napięć na oscyloskopie,
- 5) określić częstotliwość, przy której w układzie wystąpił rezonans napięć,
- 6) sformułować wnioski,
- 7) ocenić wykonanie ćwiczenia.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat układu,
- generator akustyczny,
- cewka indukcyjna bezrdzeniowa,
- kondensator,
- woltomierz,
- oscyloskop dwukanałowy,
- literatura – poz.[2, 4, 6].

Ćwiczenie 5

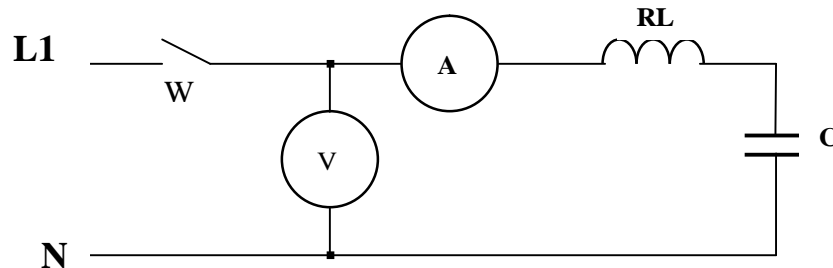
Po zamknięciu wyłącznika W, w układzie pomiarowym wskazanie amperomierza wynosi zero. Woltomierz wskazuje napięcie zasilania. Na podstawie pomiarów określ przyczynę usterki w obwodzie.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) dokonać oględzin układu,
- 2) przeprowadzić analizę wskazań mierników,
- 3) ustalić możliwe przyczyny uszkodzenia układu,

- 4) zaproponować tok postępowania przy lokalizowaniu uszkodzenia układu,
- 5) zaproponować mierniki niezbędne do zlokalizowania i usunięcia usterki,
- 6) w bezpieczny sposób zlokalizować uszkodzenie (należy notować otrzymane wyniki pomiarów),
- 7) usunąć usterkę,
- 8) sprawdzić działanie układu,
- 9) ocenić jakość wykonania zadania.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- makieta z układem pomiarowym jak na rysunku,
- mierniki i narzędzia wskazane przez ucznia,
- literatura – poz [5].

4.3.4. Sprawdzenie postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) obliczyć reaktancje i impedancje dwójników szeregowych RL , RC i RLC ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) zastosować prawo Ohma dla wartości skutecznych i amplitud w obwodzie zawierającym szeregowo połączone elementy R i L , R i C oraz R, L i C ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) zastosować II prawo Kirchhoffa dla obwodu szeregowego RLC ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) obliczyć prąd i napięcia na elementach R, L i C dwójników szeregowych RL , RC i RLC ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) narysować wykresy wektorowe dla dwójników szeregowych RL , RC i RLC ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) określić charakter dwójnika na podstawie wykresu wektorowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) scharakteryzować zjawisko rezonansu napięć?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) zmierzyć prądy i napięcia w obwodach szeregowych z elementami R , L , i C ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) zlokalizować i usunąć uszkodzenie w obwodzie jednofazowym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) wykorzystać poznane zależności i zjawiska do pomiaru indukcyjności cewek metodą techniczną?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.4. Połączenie równoległe elementów R, L, C

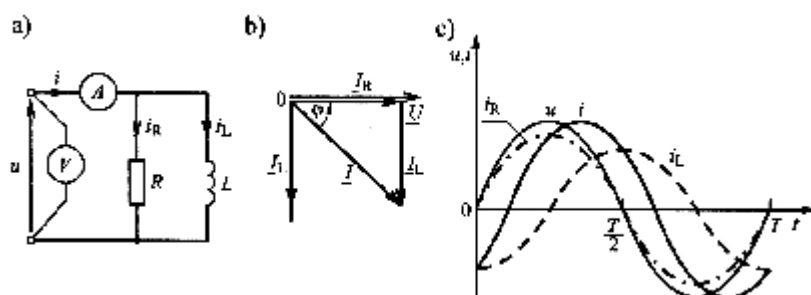
4.4.1. Materiał nauczania

Przy obliczaniu i w pomiarach obwodów składających się z równoległe połączonych elementów $R, L,$ i C wykorzystujemy prawo Ohma (słuszne dla wartości chwilowych, skutecznych, amplitud prądu i napięcia) oraz I prawo Kirchhoffa (słuszne dla wartości chwilowych prądów oraz dla wektorów prądów w obwodzie).

Równoległe połączenie R i L

Dla równoległego połączenia R i L (rys. 17), zgodnie z I prawem Kirchhoffa:

$$i = i_R + i_L$$



Rys. 17. Układ równoległy R i L , : a) schemat, b) wykres wektorowy, c) wykres czasowy [2]

Jeżeli napięcie zasilające dwójnik ma wartość: $u = U_m \sin \omega t$,

$$\text{to: } i_R = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t, \quad i_L = \frac{u}{X_L} = \frac{U_m}{X_L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad i = I_m \sin(\omega t - j)$$

j – kąt przesunięcia fazowego: $j = j_u - j_i$

Wektor prądu I pobieranego przez dwójnik RL : $\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L$

Moduł wartości skutecznej prądu (długość wektora \underline{I}):

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2} U$$

Dla równoległego połączenia R i L można obliczyć prądy w gałęziach:

$$I_R = \frac{U}{R}, \quad I_L = \frac{U}{X_L}$$

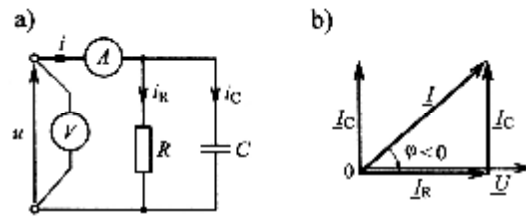
Równoległe połączenie R i C

Dla równoległego połączenia R i C (rys. 18) zgodnie z I prawem Kirchhoffa:

$$i = i_R + i_C$$

Jeżeli napięcie zasilające dwójnik ma wartość:

$$u = U_m \sin \omega t, \quad \text{to: } i = I_m \sin(\omega t + j)$$



Rys. 18. Układ równoległy RC zasilany napięciem sinusoidalnym: a) schemat obwodu, b) wykres wektorowy [2]

Wektor prądu I pobieranego przez dwójnik RC : $\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_C$

Moduł wartości skutecznej prądu (długość wektora \underline{I}):

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2} U$$

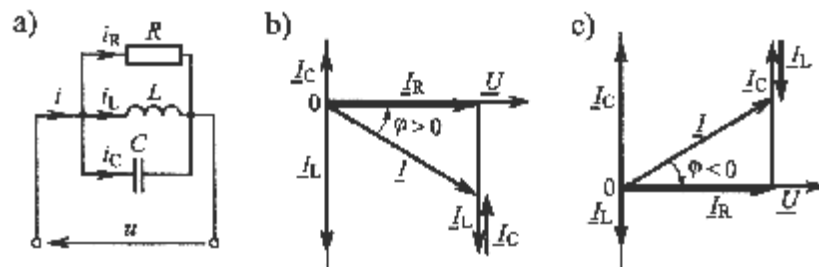
Dla równoległego połączenia R i C można obliczyć prądy w gałęziach z R i C :

$$I_R = \frac{U}{R}, \quad I_C = \frac{U}{X_C}$$

Równoległe połączenie R, L i C

Dla równoległego połączenia R, L i C (rys. 19) zgodnie z I prawem Kirchhoffa:

$$i = i_R + i_L + i_C$$



Rys. 19. Układ równoległego połączenia RLC : a) schemat dwójnika, b) wykres wektorowy dla $\varphi > 0$, c) wykres wektorowy dla $\varphi < 0$ [2]

Jeżeli napięcie zasilające dwójnik ma wartość: $u = U_m \sin \omega t$, to:

$$i = I_m \sin(\omega t + j)$$

j – kąt przesunięcia fazowego: $j = j_u - j_i$

Wektor prądu I pobieranego przez dwójnik RLC :

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C$$

Moduł wartości skutecznej prądu (długość wektora \underline{I}):

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} U$$

Moduły prądów w poszczególnych gałęziach można obliczyć następująco:

$$I_R = \frac{U}{R}, \quad I_L = \frac{U}{X_L}, \quad I_C = \frac{U}{X_C}$$

Kąt przesunięcia fazowego j można wyznaczyć wykorzystując funkcje trygonometryczne:

$$\cos j = \frac{I_R}{I}, \quad \sin j = \frac{I_L - I_C}{I}$$

Rezonans prądów

Mówimy, że w obwodzie równoległe połączonych R , L i C (rys. 19) zachodzi rezonans, gdy:

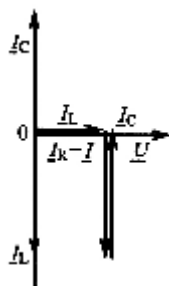
$$\omega C = \frac{1}{\omega L}$$

Rezonans w tym obwodzie nazywamy rezonansem prądów lub rezonansem równoległym.

Częstotliwość oraz pulsację przy której zachodzi rezonans wyznaczamy ze wzoru:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Zjawisko rezonansu można osiągnąć w układach składających się z elementów R , L , C poprzez zmianę parametrów L i C lub częstotliwości napięcia zasilającego obwód.



Rys. 20. Wykres wektorowy dla równoległego obwodu RLC w stanie rezonansu [w oparciu o 2]

Dla obwodu w stanie rezonansu równoległego słuszne są poniższe zależności:

$$I_L = I_C; \quad I = I_R; \quad I = \frac{U}{R}; \quad j = 0$$

- przesunięcie fazowe jest równe zero,
- wypadkowa moc bierna układu jest równa zero,
- prąd w gałęzi z indukcyjnością jest równy prądowi w gałęzi z pojemnością, a suma wektorów tych prądów jest równa zero (całkowita kompensacja prądów),
- prąd całkowity w obwodzie osiąga najmniejszą wartość.

W stanie rezonansu prądów prąd w obwodzie osiąga bardzo małe wartości – przy dużej rezystancji R źródło pracuje w warunkach zbliżonych do stanu jałowego.

Prądy w gałęziach z L i C mogą osiągać znaczne wartości, dużo większe od prądu pobieranego przez układ ze źródła. Zjawisko to nazywamy przetężeniem.

Zjawiska zachodzące w obwodzie rezonansowym są wykorzystywane m.in. w filtrach częstotliwościowych, a także w urządzeniach elektroenergetycznych do kompensacji mocy biernej [1, 2]

4.4.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jakie wartości może przyjmować kąt przesunięcia fazowego j w dwójniku równoległym RL , a jakie w RC i w RLC ?
2. Jak obliczamy wartość skuteczną prądu sinusoidalnego pobieranego ze źródła przez dwójnik równoległy RL , RC , RLC ? Czy ten prąd zależy od częstotliwości napięcia zasilającego?
3. Jakie są warunki rezonansu w obwodzie równoległym RLC ?

4.4.3.Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Rezystor o rezystancji $R = 46 \Omega$ i cewkę o indukcyjności $L = 70 \text{ mH}$ połączono równolegle i zasilano napięciem sinusoidalnym o wartości $U = 230 \text{ V}$ i częstotliwości $f = 50 \text{ Hz}$. Oblicz wartość prądu pobieranego przez ten dwójnik ze źródła.

Sposób wykonania ćwiczenia:

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować schemat ideowy dwójnika równoległego RL i oznaczyć prądy,
- 2) obliczyć prąd w gałęzi z rezystancją i prąd w gałęzi z indukcyjnością oraz prąd całkowity,
- 3) sporządzić wykres wektorowy,
- 4) przeanalizować wpływ wzrostu częstotliwości (np. dwukrotnego) na parametry dwójnika i sformułować wnioski dotyczące prądów w obwodzie.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- przybory do rysowania, papier milimetrowy,
- kalkulator.

Ćwiczenie 2

Jaki prąd zostanie pobrany przez układ równolegle połączonych: rezystora o rezystancji $R = 100 \Omega$, cewki o indukcyjności $L = 0,25 \text{ H}$ i kondensatora o pojemności $C = 88 \mu\text{F}$, jeżeli układ ten dołączono do napięcia $U = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Określ charakter tego obwodu na podstawie wykresu wektorowego i oceń czy zmieni się charakter obwodu, jeżeli częstotliwość napięcia zasilającego zmniejszy się dwukrotnie.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować schemat dwójnika równoległego RLC i oznaczyć napięcie i prądy,
- 2) wymienić i obliczyć wielkości potrzebne do sporządzenia wykresu wektorowego (w obliczeniach stosować oznaczenia przyjęte w schemacie),
- 3) narysować wykres wektorowy dla tego dwójnika,
- 4) określić przesunięcie fazowe,
- 5) na podstawie obliczeń i wykresu ocenić charakter tego obwodu,
- 6) przeanalizować wpływ zmniejszenia częstotliwości na parametry obwodu i jego charakter,
- 7) ocenić jakość wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- przybory do rysowania, papier milimetrowy,
- kalkulator lub komputer z programem graficznym i arkuszem kalkulacyjnym.

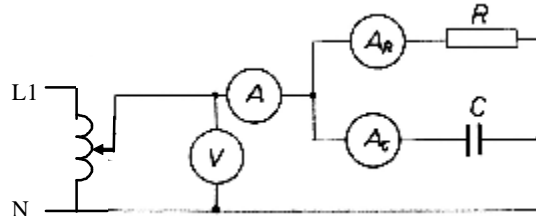
Ćwiczenie 3

Na podstawie pomiarów określ dla dwójnika RC : rezystancję R rezystora i pojemność C kondensatora.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zestawić układ pomiarowy jak na rysunku,
- 2) określić wielkości, które musi zmierzyć i obliczyć,
- 3) zaproponować tabelę do zanotowania niezbędnych pomiarów i obliczeń,
- 4) wykonać pomiary i obliczenia,
- 5) narysować wykres wektorowy,
- 6) sformułować wnioski,
- 7) ocenić wykonanie ćwiczenia.



Rysunek do ćwiczenia [6]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat obwodu pomiarowego,
- amperomierze, woltomierz,
- rezystor laboratoryjny,
- kondensator,
- częstotliciomierz,
- autotransformator,
- kalkulator i przybory do rysowania lub komputer z programem graficznym i arkuszem kalkulacyjnym.

4.4.4. Sprawdzenie postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) zastosować prawo Ohma w obwodzie zawierającym równoległe połączone elementy R i L , R i C oraz R, L i C ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) zastosować I prawo Kirchhoffa dla obwodu równoległego RLC ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) obliczyć prądy płynące przez elementy R , L i C dwójników równoległych RL , RC i RLC oraz prąd pobierany przez dwójnik?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) narysować wykresy wektorowe dla dwójników równoległych RL, RC i RLC ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) określić charakter dwójnika na podstawie wykresu wektorowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) zanalizować wpływ zmian parametrów R , L i C obwodu na charakter tego obwodu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) scharakteryzować zjawisko rezonansu prądów?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) połączyć układ równoległy i przeprowadzić pomiary napięcia i prądów?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

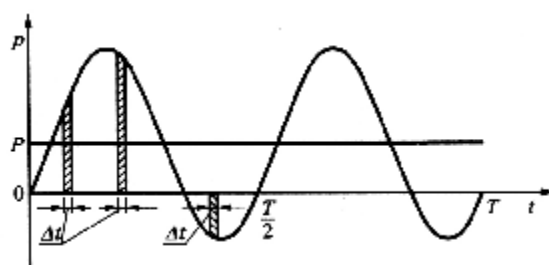
4.5. Moc i energia prądu sinusoidalnego. Poprawa współczynnika mocy

4.5.1. Materiał nauczania

W obwodzie prądu sinusoidalnego zasilanym napięciem o wartości chwilowej u , pobierającym prąd o wartości chwilowej i , moc zmienia się również sinusoidalnie. Wartość chwilowa mocy jest równa iloczynowi prądu i napięcia:

$$p = ui$$

Ponieważ w obwodzie prądu zmiennego napięcie i prąd zmieniają w czasie swoją wartość oraz znak, moc chwilowa ma wartość dodatnią w tych przedziałach czasu, w których wartości chwilowe prądu i napięcia mają te same znaki, oraz ujemną, w przedziałach czasu, gdzie napięcie i prąd mają znaki przeciwne (rys. 21).



Rys. 21. Przebieg mocy chwilowej odbiornika o charakterze rezystancyjno-reaktancyjnym [2]

Jeżeli $p > 0$, to energia jest dostarczana ze źródła do odbiornika; jeżeli $p < 0$, to energia jest zwracana przez odbiornik do źródła.

Energia dostarczana do odbiornika w równych przedziałach czasu Δt jest różna, ponieważ wartości chwilowe mocy dla poszczególnych przedziałów czasu są różne. Energia w czasie Δt wynosi:

$$\Delta W = p\Delta t$$

Graficznie tę energię ilustruje pole powierzchni paska o podstawie Δt . Sumując iloczyny $p\Delta t$ w ciągu całego okresu otrzymamy energię pobraną w ciągu okresu T :

$$W = pt$$

Po podzieleniu przez T otrzymujemy wartość średnią mocy chwilowej za okres, którą nazywamy mocą czynną. Moc czynną mierzą watomierze, a obliczamy ją z zależności:

$$P = UI \cos j$$

U - wartość skuteczna napięcia sinusoidalnego, I - wartość skuteczna prądu sinusoidalnego, $\cos j$ –współczynnik mocy (cosinus kąta przesunięcia fazowego).

Mocą czynną P nazywamy wartość średnią mocy chwilowej. Jednostką mocy czynnej jest 1 wat (1W).

Energia elektryczna czynna jest wprost proporcjonalna do mocy i czasu poboru tej mocy.

$$W = Pt$$

Zwyczajowo przyjęte jest określanie energii czynnej po prostu energią elektryczną.

Energię pobieraną w dłuższym czasie przez odbiorniki o znacznej mocy wyrażamy w kilowatogodzinach (kWh).

Dla urządzeń elektrycznych o określonych wartościach znamionowych napięcia U oraz prądu I określamy moc pozorną S :

$$S = UI$$

Moc pozorna jest iloczynem wartości skutecznych napięcia i prądu.

Jednostką mocy pozornej jest 1 woltoamper (1VA). Moc pozorna jest równa największej wartości mocy czynnej. Zachodzi to przy $\cos j = 1$, a więc przy $j = 0$.

W obwodach prądu sinusoidalnego określa się także moc bierną Q :

$$Q = UI \sin j$$

Moc bierna (reaktancyjna) jest iloczynem wartości skutecznych napięcia i prądu oraz sinusa kąta przesunięcia fazowego. Jednostką mocy biernej jest 1 var(1 var).

Pomiędzy mocami: czynną, bierną i pozorną zachodzi zależność:

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad \text{stąd:} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\text{Funkcje kąta } j \text{ można określić z zależności:} \quad \operatorname{tg} j = \frac{Q}{P}; \quad \cos j = \frac{P}{S}$$

Na podstawie zależności pomiędzy napięciem i prądem sinusoidalnym zachodzących dla elementów R , L i C (omówionych w rozdziałach 4.2.1, 4.3.1 i 4.4.1) oraz przedstawionych wyżej zależności dotyczących mocy, dla poszczególnych elementów R , L i C oraz ich połączeń słuszne są zależności i twierdzenia dotyczące mocy przedstawione poniżej.

Moc w idealnym rezystorze

W idealnym rezystorze przesunięcie fazowe $j = 0$, moc chwilowa p może przyjmować wyłącznie wartości dodatnie, tzn., że rezystor może tylko pobierać energię elektryczną, która natychmiast zostaje przemieniona w ciepło.

Moc czynna (wartość średnia mocy chwilowej) związana z rezystorem:

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

Dla rezystora idealnego $Q = 0$, ponieważ $\sin 0 = 0$, stąd $P = S$.

MOC W IDEALNEJ CEWCE

W cewce idealnej napięcie sinusoidalne wyprzedza prąd o kąt fazowy $j = 90^\circ$, stąd otrzymujemy :

$$P = 0$$

Wartość średnia mocy chwilowej (moc czynna) dla idealnej cewki jest równa zeru.

Moc ta oscyluje pomiędzy źródłem zasilającym, a cewką, przyjmując na przemian wartości dodatnie i ujemne.

Dla idealnej cewki określamy moc bierną indukcyjną:

$$Q_L = UI \sin \frac{P}{2} = X_L I^2 = UI = S$$

Moc w idealnym kondensatorze

W idealnym kondensatorze napięcie sinusoidalne opóźnia się względem prądu o kąt fazowy $j = -90^\circ$, stąd otrzymujemy: $P = 0$.

Wartość średnia mocy chwilowej (moc czynna) dla idealnego kondensatora jest równa zero. Moc ta oscyluje pomiędzy źródłem zasilającym, a kondensatorem przyjmując na przemian wartości dodatnie i ujemne.

Dla idealnego kondensatora określamy moc bierną pojemnościową:

$$Q_C = UI \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -X_C I^2 = -UI$$

Jest ona równa co do bezwzględnej wartości mocy pozornej $S = |Q|$

Moc szeregowo połączonych R , L i C

Przy połączeniu elementów R , L i C o mocy czynnej decyduje tylko moc pobrana przez rezystor R , bowiem dla cewki i kondensatora moc średnia (czynna) jest równa zero. Zatem słuszne są zależności ogólne:

$$P = UI \cos j = RI^2, \quad Q = UI \sin j = XI^2, \quad S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\cos j = \frac{R}{Z}, \quad \sin j = \frac{X}{Z};$$

Należy pamiętać, że w obwodzie zawierającym elementy R , L i C moc bierna układu:

$$Q = Q_L + Q_C = (X_L - X_C)I^2 = XI^2$$

$$X = X_L - X_C, \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Ponadto, jeżeli:

- $X > 0$ (gdy $X_L > X_C$), to kąt j jest dodatni – obwód ma charakter indukcyjny i $Q_L > Q_C$
- $X < 0$ (gdy $X_L < X_C$), to kąt j jest ujemny – obwód ma charakter pojemnościowy i $Q_L < Q_C$
- $X = 0$ (gdy $X_L = X_C$), to $j = 0$ - obwód ma charakter rezystancyjny (w obwodzie zachodzi zjawisko rezonansu napięć), moc bierna $Q = 0$.

Połączenia szeregowo elementów R i L , to przypadek, gdy $X_C = 0$.

Połączenia szeregowo elementów R i C , to przypadek, gdy $X_L = 0$.

Moc równoległe połączonych R i C

Moc czynna w dwójniku równoległym RC związana jest z rezystancją R i obliczamy ją następująco:

$$P = UI \cos j = UI_R = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

Moc bierna: $Q = UI \sin j = -I_C U = -\omega C U^2$

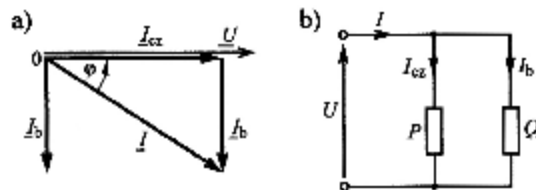
Moc pozorna: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Schemat zastępczy rzeczywistego kondensatora jest równoważny dwójnikowi równoległemu RC , zatem moc kondensatora o skończonej rezystancji dielektryka obliczamy tak, jak dla dwójnika RC .

Moc równoległe połączonych R, L i C

Zależności występujące przy obliczaniu mocy pobranej przez odbiorniki zawierające równoległe połączone elementy RLC są analogiczne jak dla dwójników RL i RC .

Prąd pobierany przez równoległe połączone elementy R, L i C możemy rozłożyć na dwie składowe: czynną i bierną (rys. 22).



Rys. 22. Rozkład wektora prądu w obwodzie rozgałęzionym na składowe [2]

Moc czynna jest związana z rezystancją R :

$$P = UI \cos j = UI_R = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

Moc bierna jest związana z elementami biernymi, tzn. z cewką i z kondensatorem.

$$Q = UI \sin j = I_b U$$

Moc pozorna układu: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

gdzie: $I_{cz} = I \cos j$ – składowa czynna prądu,

$I_b = I \sin j$ – składowa bierna prądu (wektor $\underline{I}_b = \underline{I}_L + \underline{I}_C$).

Moduły prądów można obliczyć następująco:

$$I_{cz} = \frac{U}{R}, \quad I_b = \frac{U}{X}, \quad I = \sqrt{I_{cz}^2 + I_b^2}, \quad I_L = \frac{U}{X_L}, \quad I_C = \frac{U}{X_C}$$

U – napięcie doprowadzone do równoległego połączenia RLC ,

I – prąd pobierany przez układ równoległe połączonych R, L i C ; wektor $\underline{I} = \underline{I}_{cz} + \underline{I}_b$,

j – przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem a prądem wypadkowym I .

Dla wielu połączonych równoległe elementów R, L , i C można sumować algebraicznie składowe czynne prądu (są w fazie z napięciem) oraz składowe bierne, uwzględniając, że prądy I_L oraz I_C są w przeciwfazie (mają przeciwne zwroty).

Znaczenie współczynnika mocy i jego poprawa

Współczynnik mocy ($\cos j$) odgrywa ważną rolę z punktu widzenia efektywności wykorzystania urządzeń elektrycznych.

W praktyce najczęściej do sieci są przyłączane równoległe odbiorniki o różnym charakterze. Odbiorniki te: silniki, urządzenia grzejne, oświetlenie są dobierane pod kątem mocy czynnej, której odpowiada energia użyteczna, pobrana przez te urządzenia

i przekształcana w inny rodzaj energii (mechaniczną, ciepłą, świetlną). Prąd niezbędny do doprowadzenia tej energii zależy od współczynnika mocy ($\cos j$), ponieważ: $P = UI \cos j$, stąd:

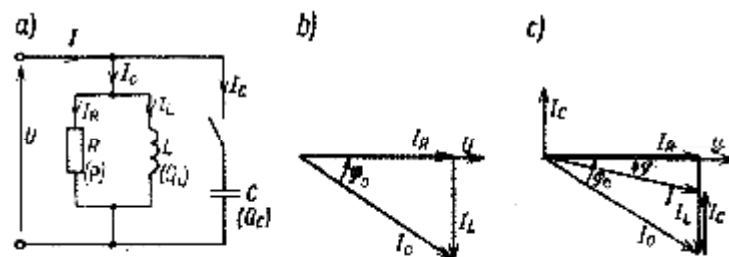
$$I = \frac{P}{U \cos j}$$

Z podanej zależności wynika, że jeżeli $\cos j$ jest mały, to dostarczenie mocy P przy określonym napięciu U wymaga przepływu prądu o większej wartości. Dostarczanie energii przy małym $\cos j$ jest zatem niekorzystne, ponieważ:

- zwiększona wartość prądu wymaga stosowania przez dostawcę energii przewodów zasilających o większych przekrojach,
- większa wartość prądu powoduje większe straty mocy czynnej (zamienianej w ciepło oddawane do atmosfery) w liniach przesyłowych łączących źródło energii z odbiornikiem,
- zwiększenie poboru prądu wymaga zastosowania większych prądnic i transformatorów.

Dąży się do tego, aby współczynnik mocy był bliski jedności. W tym celu stosuje się poprawę współczynnika mocy, której istotą jest kompensacja mocy biernej indukcyjnej mocą bierną pojemnościową.

Poprawę współczynnika mocy realizuje się poprzez dołączenie równolegle do odbiornika o charakterze indukcyjnym (np. silnika indukcyjnego), kondensatora (baterii kondensatorów) o odpowiednio dobranej pojemności. Schemat układu i wykres ilustrujący to zjawisko przedstawiono na rys. 23.



Rys. 23. Wyjaśnienie zasady kompensacji mocy biernej: a) schemat obwodu, b) wykres wektorowy dla przypadku odbiornika o charakterze indukcyjnym bez kondensatora, c) . wykres wektorowy dla przypadku kondensatora dołączonego do odbiornika o charakterze indukcyjnym [1]

Z analizy wykresów wynika, że:

Przed dołączeniem kondensatora:

- prąd w linii $I = I_0$,
- składowa bierna prądu $I_b = I_L$,
- moc bierna układu: $Q = Q_L$.

Po dołączeniu kondensatora:

- prąd w linii: $I < I_0$,
- składowa bierna prądu: $I_b = I_L - I_C$,
- moc bierna układu: $Q = Q_L - Q_C$,
- współczynnik mocy układu: $\cos j > \cos j_0$,
- moc czynna układu nie zmienia się.

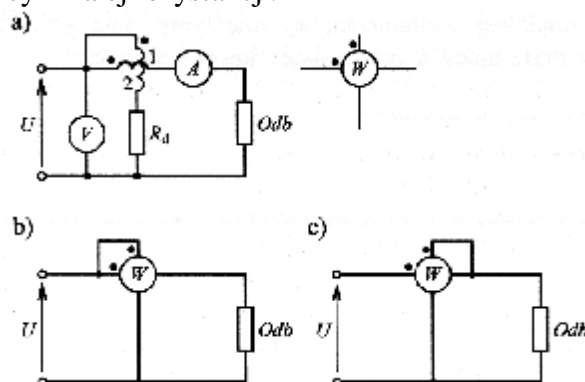
Pojemność C kondensatora obliczamy z zależności: $C = \frac{Q_C}{wU^2}$

Aby uzyskać kompensację całkowitą mocy biernej indukcyjnej mocą bierną pojemnościową należy tak dobrać pojemność C , aby $I_C = I_L$. Wówczas $Q_C = UI_C$, prąd I dopływający do obwodu jest równy prądowi I_R , a współczynnik mocy jest równy jedności. Jak wcześniej podano obwód w którym ma to miejsce znajduje się w stanie rezonansu. Obwód w stanie rezonansu nie pobiera ze źródła mocy biernej (moc bierna wypadkowa jest równa zero) – występuje pełna kompensacja mocy biernej, ponieważ w stanie rezonansu moc bierna indukcyjna jest równa mocy biernej pojemnościowej.

W praktyce stosuje się kompensację niepełną, to znaczy dąży się do osiągnięcia współczynnika mocy bliskiego jedności.

Pomiar mocy

Do pomiaru mocy w obwodach prądu przemiennego stosowane są najczęściej watomierze o ustroju elektrodynamicznym lub ferrodynamicznym. Są to mierniki o dwóch cewkach: cewce prądowej i napięciowej. Początki cewek są oznaczone na obudowie kropką (gwiazdka). Cewkę prądową zawsze włączamy w obwód szeregowo (jak amperomierz), a cewkę napięciową równolegle (jak woltomierz). Sposób włączenia watomierza w obwodzie jednofazowym przedstawiono na rys. 24. Układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 24b jest właściwy dla odbiorników o dużej rezystancji i małej mocy, a układ z rysunku 24c dla odbiorników o dużej mocy i małej rezystancji.



Rys. 24. Sposoby włączenia watomierza: a) schemat elektryczny i symbol watomierza, gdzie: 1 - cewka prądowa, 2 - cewka napięciowa, R_d - rezystor poszerzający zakres napięciowy, b) pomiar mocy odbiornika i cewki prądowej, c) pomiar mocy odbiornika i cewki napięciowej [2]

Watomierze mają zwykle kilka zakresów prądowych i kilka napięciowych. Dla watomierzy wyskalowanych w działkach należy obliczyć stałą dla wybranych zakresów.

$$\text{Stała watomierza: } C_W = \frac{U_{\max} I_{\max} \cos j_W}{a_n},$$

gdzie: U_{\max}, I_{\max} – wartości maksymalne wybranych zakresów watomierza,

a_n – znamionowa liczba działek,

$\cos j_W$ – cosinus kąta pomiędzy prądami w cewkach prądowej i napięciowej; na ogół watomierze są tak budowane, aby $\cos j_W = 1$, jeżeli ma inną wartość producent podaje ją na tarczy podziałkowej watomierza.

Moc wskazana przez watomierz:

$$P = C_W a,$$

gdzie a oznacza odczytaną liczbę działek.

Pomiar energii elektrycznej

Energia elektryczna czynna jest wprost proporcjonalna do mocy i czasu poboru tej mocy.

$$W = Pt$$

Energię można zmierzyć pośrednio mierząc moc (właściwą metodą) i czas.

Do pomiaru energii służą liczniki indukcyjne. Liczniki zliczają moc pobraną w jednostce czasu. Na każdym liczniku umieszczona jest tabliczka znamionowa, na której podane są m.in. znamionowe napięcie i jego częstotliwość, prąd oraz stała licznika C_L . Stała licznika określa liczbę obrotów tarczy licznika przy poborze energii równej 1 kWh. Na jej podstawie można określić pośrednio moc odbiorników przyłączonych do licznika:

$$P = \frac{n}{C_L} \text{ [kW]}, \text{ gdzie } n - \text{liczba obrotów tarczy w ciągu 1 godziny [1, 2]}$$

4.5.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jaką zależnością określamy moc chwilową, czynną, bierną i pozorną obwodu zasilanego napięciem sinusoidalnym? Jakie są jednostki tych mocy?
2. Czy moc czynna zależy od częstotliwości napięcia zasilającego?
3. Jaka jest wartość mocy czynnej związana z idealną cewką, idealnym kondensatorem?
4. Jaką zależnością określamy moc bierną idealnej cewki, idealnego kondensatora?
5. Jaką zależnością określamy moc czynną, a jaką zależnością moc bierną rzeczywistej cewki, rzeczywistego kondensatora?
6. Jak obliczamy moc szeregowych i równoległych obwodów RLC ?
7. Jaki związek zachodzi pomiędzy mocami czynną, bierną i pozorną w obwodach RLC ?
8. Co to jest współczynnik mocy ?
9. Dlaczego warto poprawiać współczynnik mocy i jakie są metody jego poprawy?
10. Jak włączamy watomierz do pomiaru mocy w układzie jednofazowym?
11. Jak można zmierzyć energię elektryczną?

4.5.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz moc rzeczywistej cewki (schemat zastępczy szeregowy), której rezystancja $R = 40 \Omega$, a indukcyjność $L = 20 \text{ mH}$. Cewka jest zasilana napięciem sinusoidalnym $U = 15 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować schemat cewki,
- 2) obliczyć moc czynną, bierną i pozorną,
- 3) sformułować i zapisać wnioski,
- 4) ocenić wykonanie ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- komputer z programem graficznym i arkuszem kalkulacyjnym.

Ćwiczenie 2

Oblicz moce dla dwójnika RLC – dla szeregowego połączenia elementów $R = 800 \Omega$, $L = 20 \text{ mH}$, $C = 4 \mu\text{F}$. Dwójnik jest zasilany napięciem sinusoidalnym $U = 50 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować schemat dwójnika,
- 2) obliczyć moc czynną, bierną i pozorną układu,
- 3) sformułować i zapisać wnioski,
- 4) ocenić jakość wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- komputer z programem graficznym i arkuszem kalkulacyjnym.

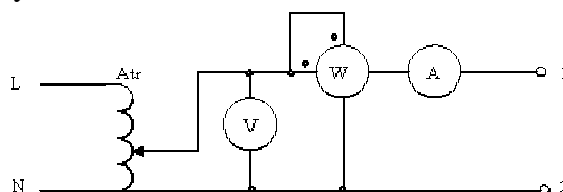
Ćwiczenie 3

Zmierz moce różnych odbiorników w obwodzie prądu jednofazowego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) połączyć układ według schematu,
- 2) zapoznać się z danymi znamionowymi odbiorników wskazanych przez nauczyciela,
- 3) ustawić właściwe zakresy pomiarowe mierników,
- 4) do punktów 1 i 2 układu dołączyć odbiornik,
- 5) za pomocą autotransformatora nastawić właściwe napięcie zasilania dla odbiornika,
- 6) zmierzyć napięcie, prąd i moc czynną odbiornika,
- 7) wyznaczyć (obliczyć), korzystając z zależności podanych w tym rozdziale moce: bierną i pozorną odbiornika,
- 8) na podstawie pomiarów i obliczeń sformułować wnioski,
- 9) ocenić poprawność wykonania ćwiczenia.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat układu pomiarowego,
- woltomierz, amperomierz, watomierz,
- autotransformator,
- odbiorniki o różnym charakterze (np. grzejnik, żarówka, silnik jednofazowy),
- komputer z programem graficznym i arkuszem kalkulacyjnym.

Ćwiczenie 4

Pomiar mocy i poprawa współczynnika mocy.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z przewodnim tekstem do ćwiczenia, otrzymanym od nauczyciela,
- 2) wykonać ćwiczenie według przewodniego tekstu.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- urządzenia i mierniki wskazane przez ucznia,
- literatura – poz.1 i 2,
- komputer z programem graficznym i arkuszem kalkulacyjnym.

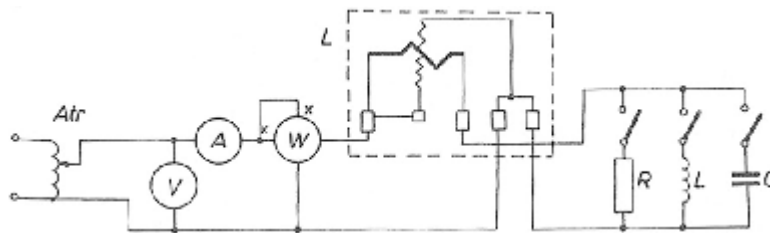
Ćwiczenie 5

Zmierz energię pobieraną przez różne odbiorniki elektryczne.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odczytać i zapisać dane umieszczone na tarczy licznika i parametry odbiorników,
- 2) podłączać do licznika kolejno poszczególne odbiorniki oraz ich połączenia: RL , RC , RLC ,
- 3) policzyć ilość N obrotów tarczy licznika w ciągu 10 minut dla poszczególnych odbiorników,
- 4) obliczyć energię pobraną przez odbiornik, a zmierzoną przez licznik, ze wzoru: $W = \frac{N}{C_L}$
- 5) zapisać wnioski,
- 6) ocenić jakość wykonania ćwiczenia.



Rysunek do ćwiczenia [6]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat układu pomiarowego,
- woltomierz, amperomierz, watomierz,
- autotransformator,
- odbiorniki: rezystor, cewka, kondensator,
- licznik indukcyjny jednofazowy.

4.5.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) obliczyć moc idealnych elementów R , L i C ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) nazwać składowe mocy i podać ich jednostki?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) obliczyć moc szeregowo połączonych elementów RL , RC , RLC ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) obliczyć moc równoległe połączonych elementów RL , RC ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) uzasadnić cel poprawy współczynnika mocy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) dobrać kondensator w celu osiągnięcia założonej poprawy $\cos j$?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) dobrać mierniki do pomiaru mocy w obwodach?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) poprawnie i w bezpieczny sposób zmierzyć moc?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) poprawnie i w bezpieczny sposób zmierzyć energię odbiornika jednofazowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.6. Stany nieustalone w obwodach *RL* i *RC*

4.6.1. Materiał nauczania

Dotychczasowe rozważania zjawisk zachodzących w układach opierały się na założeniu, że jeżeli do obwodu jest przyłożone napięcie stałe, to prąd, który w nim popłynie również nie zmienia swojej wartości w czasie. Analogiczne założenia były przyjmowane dla obwodów prądu przemiennego: sinusoidalnie zmienne w czasie wymuszenie (napięcie) spowoduje sinusoidalną odpowiedź obwodu (prąd). Taki stan układu nazywaliśmy stanem ustalonym.

Obwód elektryczny, w którym znajdują się cewki i kondensatory posiadające zdolność gromadzenia energii, po dołączeniu do źródła nie może natychmiast znaleźć się w stanie ustalonym. Ponadto, w chwili dołączenia do źródła z elementami tymi mogła być już związana pewna energia lub elementy mogą znajdować się w stanie bezenergetycznym. Energia w polu magnetycznym cewki zależy od płynącego przez nią prądu, a energia w polu elektrycznym kondensatora zależy od napięcia na jego okładzinach. Po dołączeniu do źródła obwodu zawierającego takie elementy energia gromadzona w cewkach i kondensatorach nie może być przekazana przez źródło w jednej chwili. Zmiana energii następuje w pewnym czasie i wymaga określonej mocy. Im krótszy jest czas potrzebny na przekazanie energii ze źródła, tym moc tego źródła musi być większa. Oczywiście źródeł o nieskończenie wielkiej mocy nie ma, tak więc przekazywanie energii ze źródła trwa pewien czas, w którym obwód znajduje się w stanie nieustalonym. Stan nieustalony powstaje zawsze wtedy, gdy zmienia się struktura obwodu.

Stan nieustalony może być spowodowany dołączeniem obwodu do źródła, jak i dołączeniem jakiegoś elementu do obwodu, odłączeniem elementu, przzerwaniem gałęzi obwodu. Pojęcia stanu ustalonego i nieustalonego odnoszą się do obwodów, w których działają stałe w czasie napięcia i prądy źródłowe. Po dołączeniu do obwodu źródła napięcia stałego lub przemiennego o nie zmieniającej się wartości (stałej) w obwodzie powstaje stan nieustalony, który po pewnym czasie przechodzi w stan ustalony.

Teoretycznie stan nieustalony trwa nieskończenie długo, praktycznie po pewnym czasie prąd w obwodzie i napięcia na elementach przyjmują pewne wartości ustalone. Czas ten zależy od parametrów obwodu.

Urządzenia przewidziane do pracy w stanach ustalonych znajdują się w stanie nieustalonym przy ich załączaniu i wyłączaniu. Jeżeli załączanie i wyłączanie urządzeń jest częste ze względu na specyfikę ich pracy, zjawiska związane z istnieniem stanu nieustalonego muszą być uwzględniane na etapie projektowania urządzenia. Ponadto zjawiska zachodzące w stanach nieustalonych (przebiegi, przetężenia) oddziałują na sieć zasilającą i to także musi być uwzględniane przy eksploatacji urządzeń.

Przy rozpatrywaniu zjawisk zachodzących w obwodach w stanach nieustalonych przyjmuje się pewne określenia i definicje.

Stanem początkowym obwodu nazywamy jego stan w chwili rozpoczęcia badania zjawisk zachodzących w tym obwodzie. Na ogół przyjmuje się jako stan początkowy stan w chwili $t = 0$ (czas rozpoczęcia obserwacji zjawisk). Jeżeli w stanie początkowym wszystkie napięcia i prądy w obwodzie są równe zeru, to taki stan początkowy nazywamy zerowym lub, mówimy, że warunki początkowe są zerowe. Jeżeli dla $t = 0$ płynie prąd przez jakiś element obwodu lub jest napięcie na którymkolwiek elemencie, to warunki początkowe są niezerowe.

Zmiany stanu zachodzące w obwodzie w pewnej określonej chwili nazywamy **komutacją**. Komutacja może być związana np. z zamykaniem wyłącznika łączącego obwód ze źródłem, z jego otwieraniem, a także z dołączaniem lub odłączaniem gałęzi obwodu.

Większość obwodów elektrycznych (zarówno odbiorników jak i urządzeń sieci elektroenergetycznej) zbudowana jest z elementów rezystancyjnych, indukcyjnych, pojemnościowych. W obwodach tych w chwili komutacji zachodzą stany nieustalone.

Do obwodów zawierających cewki i kondensatory, w których zachodzi komutacja odnoszą się prawa komutacji.

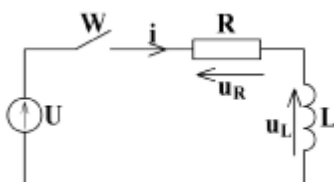
Pierwsze prawo komutacji: prąd w obwodzie z indukcyjnością nie może zmieniać się skokowo i w chwili tuż przed komutacją ma taką samą wartość jak tuż po komutacji.

Drugie prawo komutacji: napięcie na kondensatorze nie może zmieniać się skokowo i w chwili tuż przed komutacją ma taką samą wartość jak tuż po komutacji [1]

STAN NIEUSTALONY W DWÓJNIKU SZEREGOWYM RL

Załączenie obwodu RL do źródła napięcia stałego

Przyjmujemy, że do dwójnika RL (rysunek 26) w chwili $t=0$ doprowadzono napięcie stałe o wartości U , czyli zamknięcie wyłącznika nastąpiło w czasie $t=0$. Zakładamy stan początkowy zerowy, to znaczy, że tuż przed komutacją z cewką nie była związana żadna energia.



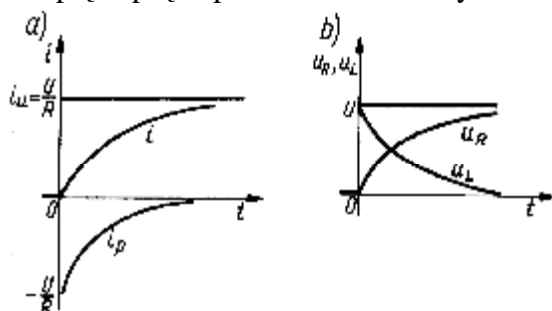
Rys. 26. Dwójnik szeregowy RL przyłączony do napięcia stałego [1]

Zgodnie z II prawem Kirchhoffa można dla tego obwodu napisać równanie:

$$U = u_R + u_L$$

Po zamknięciu wyłącznika w obwodzie zacznie płynąć prąd i , który zmienia w czasie swoją wartość: narasta od zera do pewnej ustalonej wartości i_u , którą osiągnie po czasie teoretycznie nieskończenie długim.

Wykres czasowy tych napięć i prądu przedstawiono na rysunku 27.



Rys. 27. Przebiegi czasowe prądu i napięć w szeregowym dwójniku RL włączonym do napięcia stałego:

a) przebiegi prądu, b) przebiegi napięć [1]

Prąd i płynący w tym obwodzie w każdej chwili można rozpatrywać jako sumę dwóch składowych:

$$i = i_u + i_p$$

– składową ustaloną, niezależną od czasu $i_u = \frac{U}{R}$,

– składową przejściową, której wartość maleje w miarę upływu czasu.

Rozpatrzmy wartość prądu dla czasów charakterystycznych:

$$\text{– dla } t=0: \quad i_u = \frac{U}{R}, \quad i_p = -\frac{U}{R}, \quad \text{wobec tego prąd w obwodzie } i = 0,$$

– dla $t \rightarrow \infty$: $i_p \rightarrow 0$, $i_u = \frac{U}{R}$, a prąd i dąży do wartości ustalonej $i \rightarrow i_u$.

W stanie ustalonym płynie prąd stały o wartości $I = \frac{U}{R}$.

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że udział składowej przejściowej w prądzie całkowitym jest coraz mniejszy.

Z wykresu wynika, że napięcie na cewce maleje i w stanie ustalonym wyniesie zero. W stanie ustalonym prąd jest ograniczony tylko rezystancją.

Wniosek: idealna cewka w obwodzie prądu stałego w stanie ustalonym powoduje zwarcie źródła.

Szybkość zmian prądu w obwodzie zależy od parametru obwodu, który nazywamy stałą czasową t . Stała czasowa obwodu zależy od R i L w obwodzie i obliczamy ją następująco:

$$t = \frac{L}{R}$$

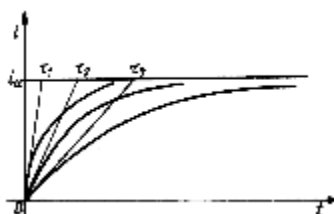
Ze wzoru wynika, że im większa indukcyjność cewki tym wolniejsze narastanie prądu do wartości ustalonej i odwrotnie. Na wartość stałej czasowej można wpływać również rezystancją obwodu. Wpływ stałej czasowej na szybkość zmian prądu ilustruje rysunek 28.

Wymiarem stałej czasowej jest 1 sekunda [1s].

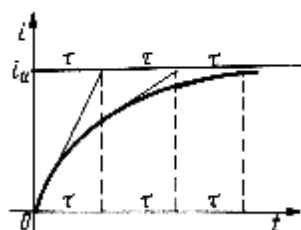
Interpretacja fizyczna stałej czasowej: stała czasowa jest to czas, po jakim prąd w obwodzie osiągnąłby wartość ustaloną, gdyby narastał liniowo, ze stałą prędkością równą początkowej. Jak widać z wykresów tak się nie dzieje i w miarę upływu czasu przyrosty prądu są coraz mniejsze.

Interpretacja graficzna stałej czasowej: stała czasowa jest to czas, jaki wyznacza styczna do przebiegu prądu i dla $t = 0$ w przecięciu z prostą prądu ustalonego (rysunek 29).

Teoretycznie stan nieustalony trwa nieskończenie długo. Praktycznie przyjmuje się, że po czasie około 5τ prąd ma wartość ustaloną.



Rys. 28. Wpływ wartości stałej czasowej na przebieg prądu w obwodzie RL w stanie nieustalonym [1]

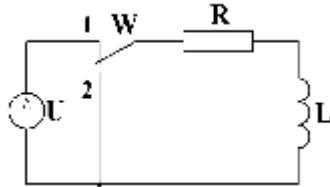


Rys. 29. Wyznaczanie graficzne stałej czasowej [1]

Zwarcie obwodu RL przy warunku początkowym niezerowym

Omówiony wyżej obwód i zjawiska zachodzące w nim odpowiadają układowi przedstawionemu na rysunku 30 przy położeniu przełącznika w pozycji 1. W tym obwodzie w stanie ustalonym płynie prąd stały o wartości $I = \frac{U}{R}$. Przy przepływie prądu przez cewkę

o indukcyjności L w jej polu magnetycznym została zgromadzona energia $W_L = \frac{1}{2}LI^2$. Po ustaleniu się wartości prądu w obwodzie (nie zmienia on swojej wartości w czasie) w cewce nie indukuje się napięcie, wówczas napięcie źródła jest równoważone spadkiem napięcia na rezystancji. Jeżeli w takim stanie obwodu, który przyjmujemy za zerowy, wyłącznik zostanie przestawiony w pozycję 2 w obwodzie rozpocznie się stan nieustalony, o warunkach początkowych niezerowych: dwójnik RL zostaje odłączony od źródła i zwarty.



Rys. 30. Zwarcie dwójnika RL przy niezerowym warunku początkowym [1]

Równanie napięć dla tego obwodu przy położeniu przełącznika w pozycji 2:

$$0 = u_R + u_L$$

$$u_R = -u_L$$

Źródłem przepływu prądu w stanie nieustalonym jest tutaj energia zgromadzona w cewce, która zamienia się w ciepło wydzielone na rezystorze. Po wyczerpaniu się tej energii prąd w obwodzie nie płynie.

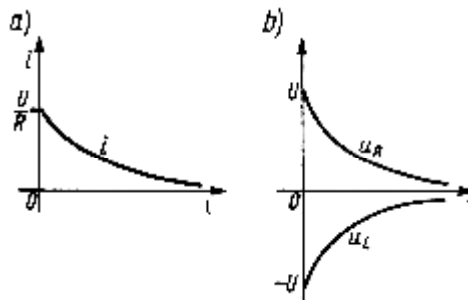
Prąd w obwodzie ma przeciwny zwrot w stosunku do prądu sprzed zwarcia i posiada tylko składową przejściową, której wartość zmienia się w czasie:

$$\text{– dla } t = 0: \quad i = i_p = \frac{U}{R},$$

$$\text{– dla } t \rightarrow \infty: \quad i \rightarrow 0.$$

$$\text{W stanie ustalonym:} \quad i = 0, \quad u_R = 0, \quad u_L = 0$$

Przebiegi napięć i prądu pokazano na rysunku 31.



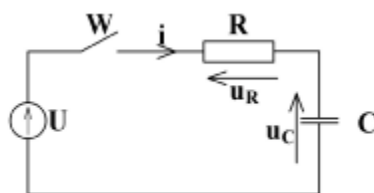
Rys. 31. Przebiegi czasowe w dwójniku szeregowym RL przy zwarcu: a) przebieg prądu, b) przebiegi napięć [1]

Stan nieustalony w dwójniku szeregowym RC

Załączenie obwodu RC do źródła napięcia stałego

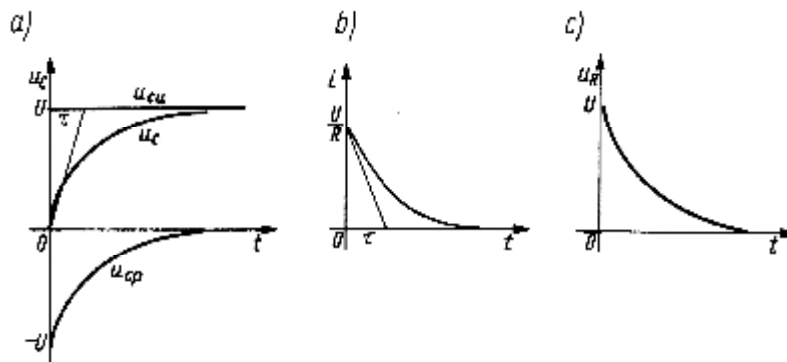
Rozpatrzony zostanie układ, w którym do szeregowo połączonych elementów R i C w chwili $t=0$ zostało doprowadzone napięcie stałe U . W układzie jak na rysunku 32 odpowiada to zamknięciu wyłącznika w chwili $t=0$.

Zakładamy zerowy stan początkowy, to znaczy, że dla $t=0$ $u_C = 0$ – z kondensatorem nie była związana żadna energia. Z chwilą zamknięcia wyłącznika (początek stanu nieustalonego) w obwodzie zacznie płynąć prąd, którego wartość zależy od pojemności kondensatora i szybkości zmian napięcia na kondensatorze w funkcji czasu.



Rys. 32. Dwójnik szeregowy RC włączony do źródła napięcia stałego [1]

Przebiegi napięć i prądu ilustruje rysunek 33.



Rys. 33. Przebiegi czasowe napięć i prądu ładowania kondensatora przez rezystancję ze źródła napięcia stałego: a) przebieg napięcia na kondensatorze oraz jego składowe – ustalona i przejściowa, b) przebieg prądu ładowania kondensatora, c) przebieg napięcia na rezystorze [1]

Stałą czasową obwodu zawierającego R i C obliczamy ją następująco:

$$t = RC$$

Jej wymiarem jest 1sekunda [1s].

Interpretacja fizyczna stałej czasowej dla obwodu RC jest następująca: stała czasowa jest to czas, po jakim kondensator naładowałby się do napięcia U , gdyby ładowanie przebiegało liniowo z początkową prędkością.

Równanie napięć dla tego obwodu ma postać:

$$U = u_R + u_C = iR + u_C,$$

a zatem w każdej chwili napięcie na kondensatorze w tym obwodzie będzie miało wartość:

$$u_C = U - u_R = U - iR$$

Ze wzoru wynika, że napięcie na kondensatorze ma dwie składowe:

- składową ustaloną, niezależną od czasu $u_{Cu} = U$
 - składową przejściową, której wartość maleje w miarę upływu czasu
- Napięcie na kondensatorze w każdej chwili jest sumą obu składowych:

$$u = u_{Cu} + u_{Cp}$$

Napięcia na kondensatorze i rezystorze oraz prąd w obwodzie dla wybranych czasów mają wartość:

- dla $t = 0$: $i = \frac{U}{R}$, $u_R = U$, $u_C = 0$
 - dla $t \rightarrow \infty$: $i \rightarrow 0$, $u_R \rightarrow 0$, $u_C \rightarrow U$
- W stanie ustalonym ($t = \infty$): $i = 0$, $u_R = 0$, $u_C = U$

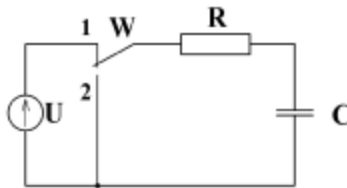
Jak można zauważyć, przepływ prądu trwa do czasu istnienia różnicy potencjałów między biegunem źródła i okładziną kondensatora, a wartość prądu zależy od różnicy tych potencjałów. Z chwilą wyrównania się potencjału źródła i kondensatora prąd przestaje płynąć.

Wniosek: w stanie ustalonym prąd w obwodzie z kondensatorem załączonym do źródła napięcia stałego nie płynie. Mówimy, że kondensator stanowi przerwę w obwodzie prądu stałego.

Teoretycznie stan nieustalony trwa nieskończenie długo. Praktycznie przyjmuje się, że po czasie około 5τ napięcie na kondensatorze ma wartość ustaloną.

Zwarcie obwodu RC przy warunku początkowym niezerowym

Omówiony wyżej obwód i zjawiska zachodzące w nim odpowiadają układowi z rysunku 34 przy położeniu przełącznika w pozycji 1. W tym obwodzie w stanie ustalonym nie płynie prąd, ponieważ kondensator stanowi przerwę dla prądu stałego. Kondensator został naładowany i napięcie na nim jest równe napięciu źródła, czyli jest równe U . Ten stan traktujemy jako ustalony. Jeżeli teraz w chwili $t = 0$ przełączymy wyłącznik z pozycji 1 w pozycję 2, oznacza to odłączenie układu od źródła napięcia i zwarcie kondensatora poprzez rezystor. W układzie zaistnieje stan nieustalony, przy czym dla $t = 0$ warunki nie będą zerowe.



Rys. 34. Zwarcie dwójnika szeregowego RC przy warunku początkowym niezerowym [w oparciu o 1]

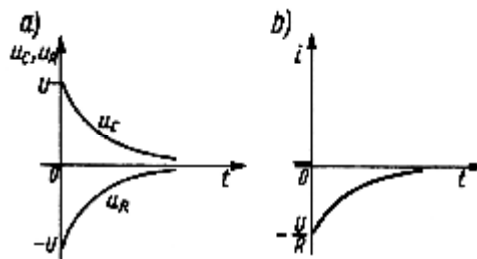
Zgodnie z drugim prawem komutacji tuż po zamknięciu wyłącznika napięcie na kondensatorze ma taką samą wartość jak tuż przed jego otwarciem, a więc U , a energia zawarta w polu elektrycznym kondensatora wynosi $W_C = \frac{1}{2}CU^2$. W miarę trwania stanu nieustalonego zasób energii zgromadzonej w polu elektrycznym kondensatora zmniejsza się kosztem zamiany tej energii na ciepło wydzielane w rezystorze. Ten stan nieustalony dla dwójnika RC nazywamy rozładowaniem kondensatora przez rezystor.

Dla obwodu zwartego można napisać równanie napięć:

$$0 = u_R + u_C = Ri + u_C$$

$$u_R = -u_C$$

Prąd w obwodzie ma taki sam charakter jak przy ładowaniu kondensatora, ale jego zwrot jest przeciwny. Przebieg napięć i prądu pokazano na rysunku 35.



Rys. 35. Przebiegi czasowe dla dwójnika szeregowego RC przy zwarcu: a) przebiegi napięć, b) przebieg prądu [1]

Napięcia na kondensatorze i rezystorze oraz prąd w obwodzie dla wybranych czasów mają wartość:

$$\text{– dla } t = 0: \quad i = -\frac{U}{R}, \quad u_R = -U, \quad u_C = U$$

$$\text{– dla } t \rightarrow \infty: \quad i \rightarrow 0, \quad u_R \rightarrow 0, \quad u_C \rightarrow 0,$$

W stanie ustalonym dla $t = \infty: i = 0, u_R = 0, u_C = 0$.

Oczywiście im większa jest stała czasowa obwodu rozładowania, tym wolniej kondensator się rozładowuje. Zwiększenie stałej czasowej obwodu można uzyskać zwiększając R lub C .

Zjawiska zachodzące w dwójniku RC podczas stanu nieustalonego są wykorzystywane w układach impulsowych, zasilaczach prądu stałego, układach sterowania.

4.6.2 Pytania sprawdzające

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

1. Kiedy w obwodzie elektrycznym powstaje stan nieustalony?
2. Jak długo trwa teoretycznie stan nieustalony, a jak długo praktycznie?
3. Jakie zjawiska występują w obwodzie RL załączonym na napięcie stałe?
4. Jak zmieniają się napięcia i prąd w dwójniku szeregowym RL załączonym na napięcie stałe?
5. Jaka jest interpretacja stałej czasowej obwodu RL ?
6. W jaki sposób obliczysz stałą czasową obwodu RL ?
7. W jaki sposób można zmniejszyć (zwiększyć) szybkość zmian prądu w obwodzie RL ?
8. Jak zachowuje się idealna cewka w obwodzie prądu stałego w chwili komutacji, a jak w stanie ustalonym?
9. Jakie zjawiska występują w obwodzie RC załączonym na napięcie stałe?
10. Jak zmieniają się napięcia i prąd w dwójniku szeregowym RC załączonym na napięcie stałe?
11. Jaka jest interpretacja stałej czasowej obwodu RC ?
12. W jaki sposób obliczysz stałą czasową obwodu RC ?
13. W jaki sposób można zmniejszyć (zwiększyć) szybkość ładowania kondensatora?
14. Jak zachowuje się idealny kondensator w obwodzie prądu stałego w chwili komutacji, a jak w stanie ustalonym?

4.6.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz stałą czasową rzeczywistej cewki o indukcyjności $L = 100$ mH i rezystancji uzwojenia $R = 10 \Omega$. Określ wartość prądu w chwili komutacji, po załączeniu do niej napięcia stałego $U = 100$ V oraz w stanie ustalonym.

Sposób wykonania ćwiczenia:

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) obliczyć stałą czasową cewki rzeczywistej,
- 2) określić wartość prądu dla: $t = 0$ i $t = \infty$,
- 3) sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- kalkulator.

Ćwiczenie 2

Kondensator o pojemności $C = 4 \mu\text{F}$ został połączony szeregowo z rezystorem $R = 0,5 \text{ M}\Omega$ i załączony do źródła napięcia stałego $U = 100$ V. Oblicz wartość prądu ładowania kondensatora tuż po komutacji ($t = 0$). Sprawdź jak na wartość prądu wpłynie dwukrotne zwiększenie rezystancji w obwodzie, a jak dwukrotne zwiększenie pojemności kondensatora.

Sposób wykonania ćwiczenia:

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) obliczyć stałą czasową i wartość prądu dla danych wyjściowych,
- 2) obliczyć stałą czasową i wartość prądu dla danych dwóch następnych przypadków,
- 3) porównać wyniki,
- 4) sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- kalkulator.

Ćwiczenie 3

Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w przedstawionym układzie wykreśl zależność $u_C = f(t)$ oraz $i = f(t)$ w obwodzie RC dla:

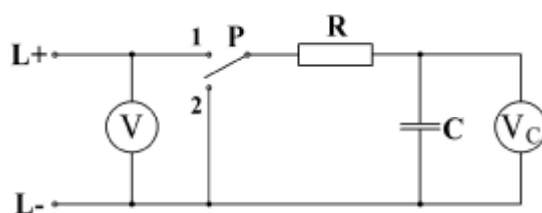
- procesu ładowania kondensatora w obwodzie prądu stałego,
- procesu rozładowania kondensatora.

Pomiary przeprowadź dla dwóch stałych czasowych: przy $R = R_1$ i $R = R_2$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z elementami układu,
- 2) zmontować układ jak na rysunku,
- 3) obliczyć stałe czasowe dla danych elementów obwodu i ustalić czas badania do 7 stałych czasowych,
- 4) narysować tabele do zapisywania wyników,
- 5) wykonać pomiary napięć dla obu stałych czasowych,
- 6) wykonać obliczenia i wykresy (we wspólnym układzie współrzędnych wykreślić napięcia dla obu stałych czasowych, analogicznie prądy),
- 7) sformułować i zapisać wnioski.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat układu pomiarowego,
- układ z kondensatorem i rezystorem (wymiennym),
- źródło napięcia stałego,
- stoper,
- 2 woltomierze magnetoelektryczne, w tym jeden o bardzo dużej rezystancji wewnętrznej.

Ćwiczenie 4

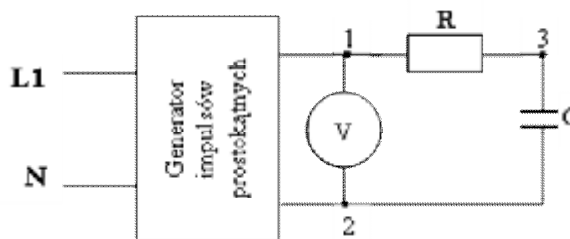
Dokonaj analizy przebiegów $u_C = f(t)$, $i = f(t)$ (kształt i taki sam jak u_R) oraz $u = f(t)$ uzyskane na ekranie oscyloskopu przy połączeniu układu RC jak na rysunku i uzasadnij ich przebieg.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z elementami układu,
- 2) zmontować układ jak na rysunku,
- 3) do zacisków układu 1-2 doprowadzić napięcie z generatora impulsów prostokątnych,
- 4) przeprowadzić badanie układu poprzez:
 - obserwację napięcia wejściowego – oscyloskop przyłączony do zacisków 1-2 i obserwację napięcia na kondensatorze – oscyloskop przyłączony do zacisków 3-2,
 - obserwację napięcia wejściowego – oscyloskop przyłączony do zacisków 1-2 i obserwację napięcia na rezystorze – oscyloskop przyłączony do zacisków 1-3,
- 5) pomiary przeprowadzić dla dwóch różnych rezystancji w obwodzie,
- 6) sformułować i zapisać wnioski.

Uwagi do ćwiczenia: należy tak dobrać okres impulsu prostokątnego, aby był on 8-10 razy większy od stałej czasowej obwodu.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat układu pomiarowego,
- układ z kondensatorem i rezystorem o zmiennych parametrach,
- generator impulsów prostokątnych,
- oscyloskop dwukanałowy.

4.6.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyjaśnić pojęcie stanu nieustalonego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) wyjaśnić zjawiska towarzyszące komutacji?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) wyjaśnić sens fizyczny stałej czasowej obwodu RL ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) zinterpretować zjawiska w obwodzie RC i RL w stanie nieustalonym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) przewidzieć wpływ parametrów obwodu na przebiegi prądu i napięć w stanie nieustalonym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) obliczyć stałą czasową obwodu RC i określić jej wpływ na przebiegi w obwodzie?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) wymienić urządzenia, w których występują częste stany nieustalone?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.7. Obwody nieliniowe

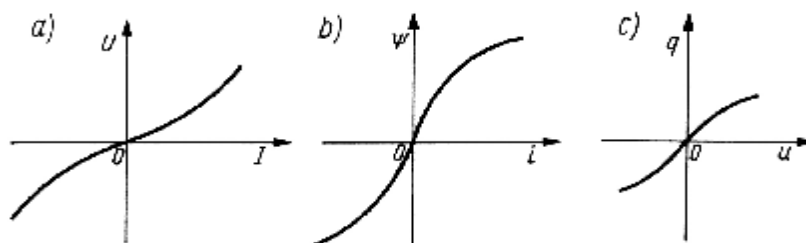
4.7.1. Materiał nauczania

Charakterystyka obwodów nieliniowych

Elementy obwodu elektrycznego, których parametry zmieniają się w zależności od prądu przepływającego przez nie lub od napięcia na zaciskach elementu, nazywamy elementami nieliniowymi. Jeżeli w obwodzie składającym się z wielu elementów jest jeden element nieliniowy, to obwód nazywamy nieliniowym. Rzeczywiste elementy R , L , C są w istocie elementami nieliniowymi.

Cechą charakterystyczną obwodów nieliniowych jest, że napięcie sinusoidalne powoduje przepływ prądu niesinusoidalnego i odwrotnie, przy przepływie prądu sinusoidalnego napięcia są niesinusoidalne.

Na rys. 36 przedstawiono charakterystyki: napięcia w funkcji prądu dla rezystora, strumienia magnetycznego skojarzonego w funkcji prądu dla cewki i ładunku na okładzinach w funkcji napięcia dla kondensatora.



Rys. 36. Charakterystyki elementów nieliniowych: a) rezystora, b) cewki, c) kondensatora [1]

Obwody nieliniowe wykorzystywane są w technice do budowy układów prostowniczych, stabilizatorów napięć i prądów, układów wytwarzających sygnały o różnych kształtach, modulacji i detekcji sygnałów. Z uwagi na trudność opisanego za pomocą równań charakterystyk elementów nieliniowych do analizy obwodów nieliniowych wykorzystuje się metodę graficzną.

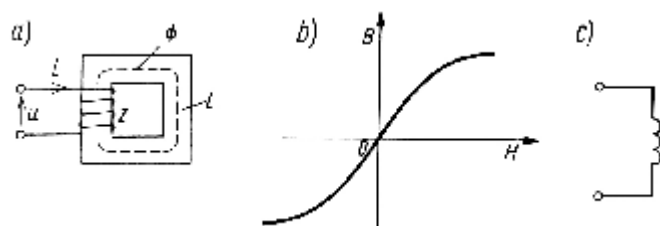
Obwody nieliniowe z elementami ferromagnetycznymi

W obwodach prądu zmiennego ważną rolę pełnią cewki z rdzeniem ferromagnetycznym. Występują one w wielu urządzeniach, np. w transformatorach, elektromagnesach, miernikach.

Cewkę z rdzeniem ferromagnetycznym o nieliniowej charakterystyce magnesowania rdzenia nazywamy dławikiem. Dławik ma bardzo dużą indukcyjność własną.

Na rysunku 37 przedstawiono cewkę z rdzeniem ferromagnetycznym (dławik) oraz charakterystykę magnesowania rdzenia ferromagnetycznego z pominięciem zjawiska histerezy.

Strumień skojarzony Ψ jest proporcjonalny do indukcji magnetycznej B , a prąd płynący przez cewkę i jest proporcjonalny do natężenia pola magnetycznego H . Jeżeli napięcie sinusoidalne przyłożone do cewki $u = U_m \sin(\omega t + \frac{p}{2})$, to strumień magnetyczny $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Strumień magnetyczny jest opóźniony względem napięcia o kąt $\pi/2$. Ze względu na nieliniowość charakterystyki $\Phi = f(i)$, charakterystyka $i = f(t)$ nie jest sinusoidą (jest odkształcona). Sposób wyznaczenia prądu i w funkcji czasu metodą graficzną przedstawiono w pozycji [1] literatury.



Rys. 37. Cewka z rdzeniem ferromagnetycznym: a) schemat, b) charakterystyka magnesowania rdzenia ferromagnetycznego, c) symbol graficzny [1]

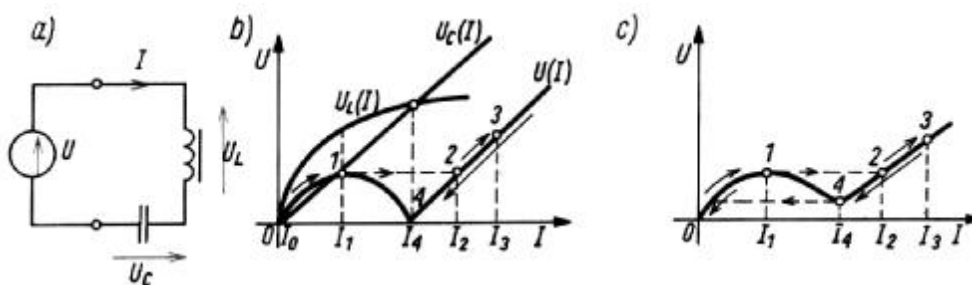
Stopień odkształcenia prądu zależy od amplitudy strumienia magnetycznego w rdzeniu cewki – dla małych amplitud wpływ nieliniowości jest mały.

Gdyby cewka była zasilana ze źródła prądu sinusoidalnego (wymuszenie sinusoidalne), to wówczas napięcie na jej zaciskach byłoby odkształcone.

Zjawisko ferrezonansu

Zjawisko ferrezonansu powstaje w obwodzie, w którym połączona jest cewka z rdzeniem ferromagnetycznym i kondensator. Do badania zjawiska ferrezonansu przyjęto założenie, że cewka jest bezrezystancyjna i pominięto zjawisko histerezy.

W układzie szeregowego połączenia cewki z rdzeniem ferromagnetycznym i kondensatora liniowego (rys. 38) zachodzi zjawisko ferrezonansu napięć.

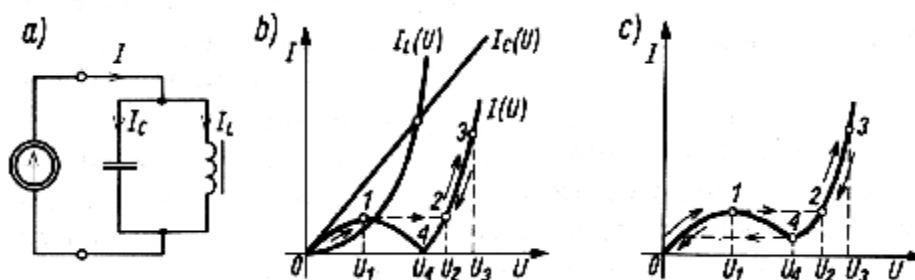


Rys. 38. Ferrezonans napięć: a) schemat obwodu, b) charakterystyka idealnej cewki nieliniowej, kondensatora liniowego i charakterystyka wypadkowa, c) charakterystyka rzeczywista [1]

Ferrezonans napięć wystąpi dla takiej wartości prądu, przy której napięcie na cewce jest równe napięciu na kondensatorze, a napięcie wypadkowe osiąga minimum.

Gwałtowna zmiana prądu przy niewielkiej zmianie napięcia i jednoczesna zmiana charakteru obwodu nosi nazwę przewrotu. Na rysunku 38c przedstawiona jest charakterystyka rzeczywista, uwzględniająca występowanie strat w cewce i kondensatorze.

W układzie równoległego połączenia cewki z rdzeniem ferromagnetycznym i kondensatora liniowego (rys. 39) zachodzi zjawisko ferrezonansu prądów.



Rys. 39. Ferrezonans prądów: a) schemat obwodu, b) charakterystyka idealnej cewki nieliniowej, kondensatora liniowego i charakterystyka wypadkowa, c) charakterystyka rzeczywista [1]

Ferrorezonans prądów wystąpi dla takiej wartości napięcia U , przy której prąd I_L w cewce jest równy prądowi I_C w gałęzi z kondensatorem, a prąd wypadkowy I osiąga minimum.

Gwałtowna zmiana napięcia przy niewielkiej zmianie prądu i jednoczesna zmiana charakteru obwodu nosi nazwę przewrotu. Na rysunku 39c przedstawiona jest charakterystyka rzeczywista, uwzględniająca występowanie strat w cewce i kondensatorze [1].

4.7.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jak można scharakteryzować elementy nieliniowe?
2. Czy możesz wskazać, które ze znanych elementów są nieliniowe?
3. Czy w cewce z rdzeniem ferromagnetycznym, do której przyłożono napięcie sinusoidalne płynie prąd sinusoidalny?
4. Jakie parametry cewki powietrznej ulegną zmianie, jeżeli włożymy do niej rdzeń ferromagnetyczny?
5. W jakim obwodzie może wystąpić ferrorezonans napięć?
6. W jakim obwodzie może wystąpić ferrorezonans prądów?

4.7.3. Ćwiczenia

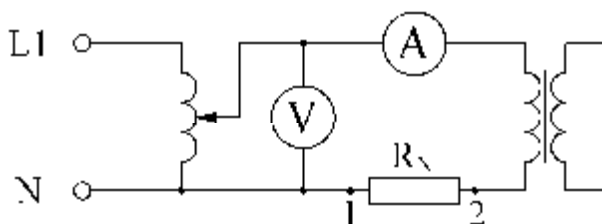
Ćwiczenie 1

Oceń wpływ nasycenia obwodu magnetycznego na kształt prądu magnesującego transformatora.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z urządzeniami i połączyć układ, jak na rysunku,
- 2) włączyć oscyloskop do punktów 1 i 2 układu (spadek napięcia na rezystancji jest proporcjonalny do prądu). napięcie zasilania sprawdzić na woltomierzu,
- 3) przerysować z oscyloskopu prąd magnesujący przy małym i dużym nasyceniu obwodu magnetycznego (regulować napięcie zasilania autotransformatorem),
- 4) ocenić wpływ nasycenia obwodu magnetycznego na kształt prądu,
- 5) sformułować wnioski.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- transformator jednofazowy,
- oscyloskop,
- autotransformator,
- rezystor wzorcowy,
- woltomierz,
- amperomierz.

Ćwiczenie 2

Zbadaj doświadczalnie wpływ rdzenia ferromagnetycznego na parametry cewki indukcyjnej załączonej w obwód napięcia sinusoidalnego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odczytać parametry cewki,
- 2) załączyć cewkę powietrzną o znanej rezystancji w obwód napięcia sinusoidalnego,
- 3) dla kilku wartości napięć zmierzyć prąd, wyznaczyć impedancję, reaktancję,
- 4) powtórzyć pomiary przy tych samych wartościach napięcia po włożeniu do cewki rdzenia ferromagnetycznego,
- 5) wykreślić w jednym układzie współrzędnych zależność $I = f(U)$ dla cewki bez rdzenia oraz cewki z rdzeniem,
- 6) wykreślić trójkąt impedancji dla cewki bez rdzenia i z rdzeniem,
- 7) sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- cewka z wymowalnym rdzeniem,
- amperomierz, woltomierz
- częstotliwościomierz,
- autotransformator,
- papier milimetry,
- komputer z programem graficznym i arkuszem kalkulacyjnym.

4.7.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- | | Tak | Nie |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 1) rozpoznać obwód zawierający element nieliniowy? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2) wskazać na podstawie charakterystyki element nieliniowy? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3) wykreślić na podstawie pomiarów charakterystykę elementu nieliniowego? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4) określić wpływ rdzenia ferromagnetycznego na indukcyjność cewki? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5) wskazać przykład obwodu w którym zachodzi ferrorezonans napięć? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6) wskazać przykład obwodu w którym zachodzi ferrorezonans prądów? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

5. SPRAWDZIAN OSIĄGNIĘĆ

INSTRUKCJA DLA UCZNI

1. Przeczytaj uważnie instrukcję – masz na tę czynność 5 minut; jeżeli są wątpliwości zapytaj nauczyciela.
2. Podpisz imieniem i nazwiskiem kartę odpowiedzi.
3. Zapoznaj się z zestawem zadań testowych.
4. Test zawiera 20 zadań. Do każdego zadania dołączone są 4 możliwości odpowiedzi. Tylko jedna jest prawidłowa.
5. Za każdą poprawną odpowiedź otrzymasz 1 punkt, za złą lub brak odpowiedzi 0 punktów.
6. Udzielaj odpowiedzi na załączonej karcie odpowiedzi zaznacz poprawną odpowiedź wstawiając znak X w odpowiednie pole w karcie odpowiedzi
7. W czasie rozwiązywania zadań możesz korzystać z kalkulatora.
8. W przypadku pomyłki błędną odpowiedź otocz kółkiem, a następnie zaznacz odpowiedź prawidłową.
9. Pracuj samodzielnie, bo tylko wtedy będziesz miał satysfakcję z wykonanego zadania.
10. Kiedy udzielenie odpowiedzi na kolejne pytanie będzie Ci sprawiało trudność, odłóż jego rozwiązanie na później i wróć do niego, gdy zostanie Ci wolny czas.
11. Na rozwiązanie testu masz 40 minut.
12. Po zakończeniu testu podnieś rękę i zaczekaj, aż nauczyciel odbierze od Ciebie pracę.

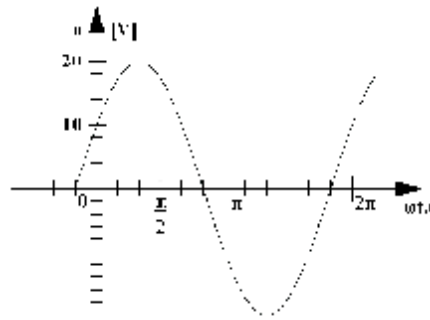
Powodzenia!

ZESTAW ZADAŃ TESTOWYCH

- Warunkiem powstawania napięcia sinusoidalnie zmiennego na zaciskach prądnicy jest
 - umieszczenie w prądnicy tylko jednej pary biegunów.
 - umieszczenie w prądnicy minimum dwóch par biegunów.
 - zasilanie prądnicy napięciem sinusoidalnym.
 - stała prędkość kątowa ω wirnika prądnicy.

- Wykres czasowy napięcia przedstawiony na rysunku opisuje zależność

- $u = 20 \sin(314t) \text{ V}$.
- $u = 10 \sin(314t + p/6) \text{ V}$.
- $u = 20 \sin(314t + p/6) \text{ V}$.
- $u = 10 \sin(314t - p/6) \text{ V}$.



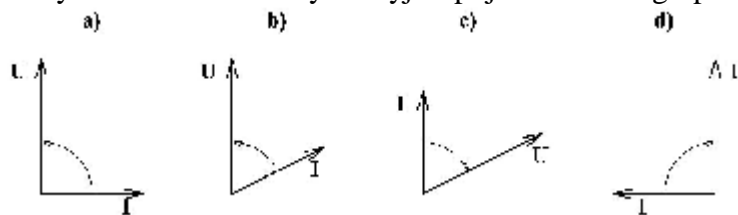
- Częstotliwość napięcia o wartości chwilowej $u = 10 \sin 314t \text{ V}$ wynosi

- 10 Hz.
- 20 Hz.
- 50 Hz.
- 100 Hz.

- Do pomiarów w obwodzie prądu sinusoidalnego **nie może** być zastosowany miernik

- magnetoelektryczny.
- elektromagnetyczny.
- elektrodynamiczny.
- ferrodynamiczny.

- Wykres wektorowy dla odbiornika rezystancyjno-pojemnościowego przedstawia rysunek



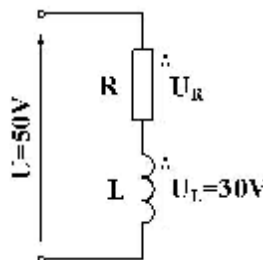
- Reaktancja idealnej cewki o indukcyjności $L = 2 \text{ H}$ zasilanej napięciem o częstotliwości $f = 100 \text{ Hz}$ przyjmuje wartość

- 1256Ω .
- 628Ω .
- 140Ω .
- 200Ω .

7. Impedancja rzeczywistej cewki, której rezystancja $R = 60 \Omega$, a reaktancja $X = 80 \Omega$ wynosi
- 20Ω .
 - 100Ω .
 - 314Ω .
 - 157Ω .

8. Wartość napięcia U_R przy zasilaniu obwodu napięciem sinusoidalnym wynosi

- 20 V .
- 40 V .
- 60 V .
- 80 V .



9. Jeżeli impedancja dwójnika szeregowego RLC zasilanego napięciem sinusoidalnym $U = 100 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$ wynosi $Z = 50 \Omega$, to do poprawnego pomiaru prądu amperomierz powinien mieć zakres

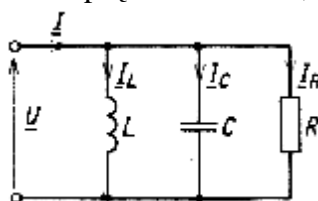
- 25 A .
- $2,5 \text{ A}$.
- 1 A .
- $0,5 \text{ A}$.

10. Warunkiem wystąpienia rezonansu napięć w szeregowym obwodzie RLC jest

- $X_L = X_C$.
- $R = X_L$.
- $R = X_C$.
- $Z = X_L$.

11. W obwodzie przedstawionym na rysunku rezonans prądów zachodzi, gdy

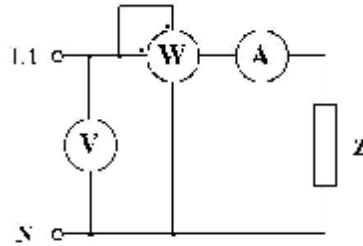
- $I = I_L = I_C$.
- $I_R = I_L = I_C$.
- $I_L = I_C$.
- $I_R = I_C$.



12. Jeżeli przez cewkę o rezystancji $R = 5 \Omega$ i reaktancji $X = 10 \Omega$ płynie prąd 2 A , to wartość mocy czynnej wynosi

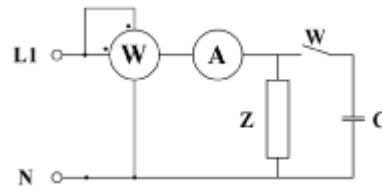
- 60 W .
- 40 W .
- 30 W .
- 20 W .

13. Wskazania mierników włączonych jak na rysunku są następujące: $U = 100 \text{ V}$, $P = 800 \text{ W}$, $I = 10 \text{ A}$. Moc bierna obwodu wynosi
- 1000 var.
 - 600 var.
 - 800 var.
 - 500 var.

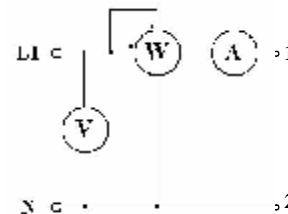


14. Wartość współczynnika mocy $\cos \phi$ odbiornika z zadania 13 wynosi
- 0,1.
 - 0,6.
 - 0,8.
 - 1,0.

15. Dołączenie kondensatora równolegle do impedancji Z wpłynie na poprawę współczynnika mocy ($\cos \phi$) układu. Na skutek tego
- wzrośnie moc czynna.
 - wzrośnie moc bierna.
 - zmaleje prąd.
 - wzrośnie prąd.



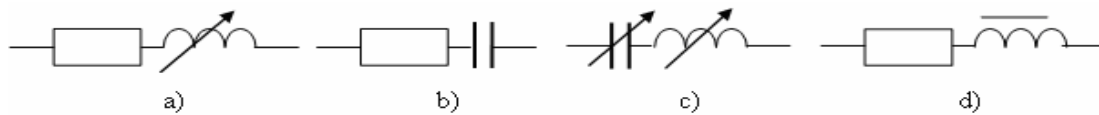
16. Jeżeli wskazania mierników wynoszą: woltomierz – 200 V, amperomierz – 0,5 A, watomierz – 100 W, to do punktów 1 i 2 obwodu dołączono
- dławik.
 - silnik.
 - kondensator.
 - żarówkę.



17. Rezystor o rezystancji $R = 2 \text{ M}\Omega$ i kondensator o pojemności $C = 0,5 \mu\text{F}$ połączono szeregowo i dołączono do źródła napięcia stałego $U = 100\text{V}$. Stała czasowa τ tego obwodu wynosi
- 0,5 s.
 - 1 s.
 - 2 s.
 - 2,5 s.
18. Idealny kondensator w obwodzie prądu stałego zachowuje się w następujący sposób:
- | | | |
|----|--------------------|--------------------|
| | w chwili komutacji | w stanie ustalonym |
| a) | zwarcie | przerwa, |
| b) | przerwa | przerwa, |
| c) | zwarcie | zwarcie, |
| d) | przerwa | zwarcie. |

19. Idealna cewka do której przyłożono napięcie stałe zachowuje się następująco:
- | w chwili komutacji | w stanie ustalonym |
|--------------------|--------------------|
| a) zwarcie | zwarcie, |
| b) przerwa | zwarcie, |
| c) zwarcie | przerwa, |
| d) przerwa | przerwa. |

20. Obwód nieliniowy przedstawiono na rysunku



KARTA ODPOWIEDZI

Imię i nazwisko.....

Obliczanie i pomiary parametrów obwodu prądu jednofazowego

Zakreśl poprawną odpowiedź

Nr zadania	Odpowiedź				Punkty
1	a	b	c	d	
2	a	b	c	d	
3	a	b	c	d	
4	a	b	c	d	
5	a	b	c	d	
6	a	b	c	d	
7	a	b	c	d	
8	a	b	c	d	
9	a	b	c	d	
10	a	b	c	d	
11	a	b	c	d	
12	a	b	c	d	
13	a	b	c	d	
14	a	b	c	d	
15	a	b	c	d	
16	a	b	c	d	
17	a	b	c	d	
18	a	b	c	d	
19	a	b	c	d	
20	a	b	c	d	
Razem:					

6. LITERATURA

1. Bolkowski S.: Elektrotechnika. WSiP, Warszawa 2005
2. Kurdziel R.: Podstawy elektrotechniki dla szkoły zasadniczej. Część 1 i 2. WSiP, Warszawa 1999
3. Markiewicz A.: Zbiór zadań z elektrotechniki. WSiP, Warszawa 2005
4. Pilawski M., Winiek T.: Pracownia elektryczna. WSiP, Warszawa 2005
5. Praca zbiorowa: Praktyczna elektrotechnika ogólna. REA, Warszawa 2003
6. Woźniak J.: Pracownia elektryczna. Tom I Pomiary elektryczne. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1995