



MINISTERSTWO EDUKACJI
NARODOWEJ



Józef Butkowski

Badanie układów elektrycznych i elektronicznych 315[01].O3.01

Poradnik dla ucznia

Wydawca

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

Recenzenci:

mgr inż. Wanda Bukała

mgr inż. Magdalena Maj

Opracowanie redakcyjne:

mgr inż. Józef Butkowski

Konsultacja:

dr inż. Anna Kordowicz-Sot

Poradnik stanowi obudowę dydaktyczną programu jednostki modułowej 315[01].O3.01 „Badanie układów elektrycznych i elektronicznych”, zawartego w programie nauczania dla zawodu technik bezpieczeństwa i higieny pracy.

Wydawca

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2007

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	4
2. Wymagania wstępne	5
3. Cele kształcenia	6
4. Materiał nauczania	7
4.1. Podstawowe pojęcia dotyczące obwodów elektrycznych. Elementy obwodów elektrycznych	7
4.1.1. Materiał nauczania	7
4.1.2. Pytania sprawdzające	10
4.1.3. Ćwiczenia	10
4.1.4. Sprawdzian postępów	12
4.2. Prawa obwodów elektrycznych prądu stałego. Sposoby strzałkowania prądów i napięć	13
4.2.1. Materiał nauczania	13
4.2.2. Pytania sprawdzające	24
4.2.3. Ćwiczenia	24
4.2.4. Sprawdzian postępów	26
4.3. Obwody prądu przemiennego jednofazowego	27
4.3.1. Materiał nauczania	27
4.3.2. Pytania sprawdzające	29
4.3.3. Ćwiczenia	30
4.3.4. Sprawdzian postępów	31
4.4. Elementy pasywne R, L, C w obwodach prądu sinusoidalnego	32
4.4.1. Materiał nauczania	32
4.4.2. Pytania sprawdzające	37
4.4.3. Ćwiczenia	37
4.4.4. Sprawdzian postępów	39
4.5. Obwody trójfazowe prądu sinusoidalnie zmiennego	40
4.5.1. Materiał nauczania	40
4.5.2. Pytania sprawdzające	43
4.5.3. Ćwiczenia	43
4.5.4. Sprawdzian postępów	45
4.6. Urządzenia grzejne	46
4.6.1. Materiał nauczania	46
4.6.2. Pytania sprawdzające	49
4.6.3. Ćwiczenia	49
4.6.4. Sprawdzian postępów	50
4.7. Źródła światła	51
4.7.1. Materiał nauczania	51
4.7.2. Pytania sprawdzające	55
4.7.3. Ćwiczenia	56
4.7.4. Sprawdzian postępów	57
4.8. Pomiary wielkości elektrycznych	58
4.8.1. Materiał nauczania	58
4.8.2. Pytania sprawdzające	63
4.8.3. Ćwiczenia	64
4.8.4. Sprawdzian postępów	66

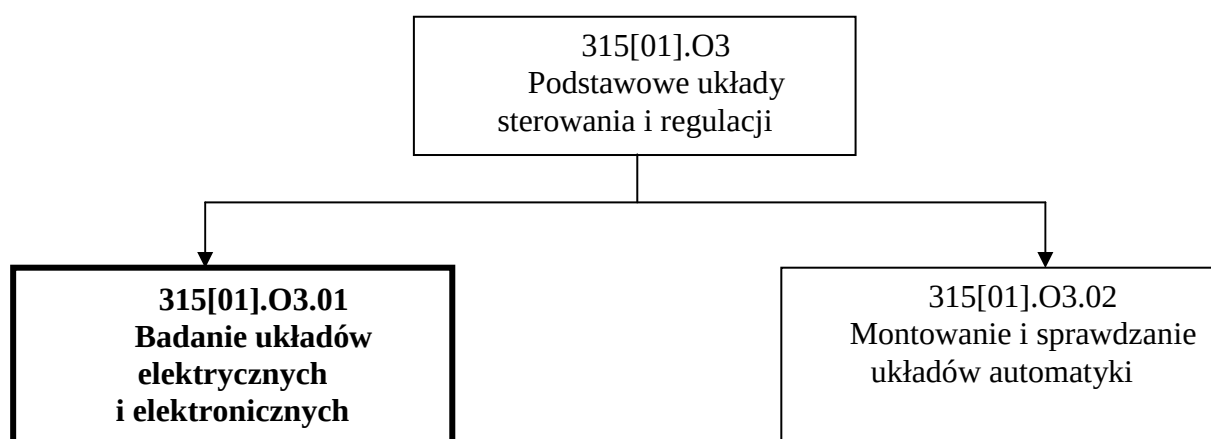
4.9. Maszyny elektryczne i transformatory	67
4.9.1. Materiał nauczania	67
4.9.2. Pytania sprawdzające	73
4.9.3. Ćwiczenia	73
4.9.4. Sprawdzian postępów	76
4.10. Instalacje elektryczne	77
4.10.1. Materiał nauczania	77
4.10.2. Pytania sprawdzające	83
4.10.3. Ćwiczenia	83
4.10.4. Sprawdzian postępów	85
4.11. Zasady bezpiecznej eksploatacji urządzeń elektrycznych	86
4.11.1. Materiał nauczania	86
4.11.2. Pytania sprawdzające	91
4.11.3. Ćwiczenia	92
4.11.4. Sprawdzian postępów	92
4.12. Podstawowe elementy i układy elektroniczne	93
4.12.1. Materiał nauczania	93
4.12.2. Pytania sprawdzające	101
4.12.3. Ćwiczenia	101
4.12.4. Sprawdzian postępów	104
5. Sprawdzian osiągnięć	105
6. Literatura	111

1. WPROWADZENIE

Poradnik będzie Ci pomocny w przyswajaniu wiedzy o podstawowych układach elektrycznych i elektronicznych i kształtowaniu umiejętności montowania i sprawdzania działania tych układów.

W poradniku zamieszczono:

- wymagania wstępne – wykaz umiejętności, jakie powinieneś mieć już ukształtowane, abyś bez problemów mógł korzystać z poradnika,
- cele kształcenia – wykaz umiejętności, jakie ukształtujesz podczas pracy z poradnikiem,
- materiał nauczania – wiadomości teoretyczne niezbędne do opanowania treści jednostki modułowej,
- zestaw pytań, abyś mógł sprawdzić, czy już opanowałeś określone treści,
- ćwiczenia, które pomogą Ci zweryfikować wiadomości teoretyczne oraz ukształtować umiejętności praktyczne,
- sprawdzian postępów,
- sprawdzian osiągnięć, przykładowy zestaw zadań. Zaliczenie testu potwierdzi opanowanie materiału całej jednostki modułowej,
- literaturę uzupełniającą.



Schemat układu jednostek modułowych

2. WYMAGANIA WSTĘPNE

Przystępując do realizacji programu jednostki modułowej powinieneś umieć:

- charakteryzować podstawowe wielkości fizyczne i jednostki miar w układzie SI,
- przeliczać jednostki wielkości fizycznych, ich wielokrotności,
- posługiwać się podstawowymi pojęciami z chemii i fizyki w zakresie budowy materii i zjawisk związanych z elektrycznością,
- odczytywać i wykonywać wykresy funkcji,
- rozwiązywać równania matematyczne, przekształcać wzory,
- odczytywać rysunki techniczne,
- wyjaśniać pojęcie wielkości wektorowej, skalarnej oraz wykonywać działania na wektorach,
- korzystać z różnych źródeł informacji,
- obsługiwać komputer,
- współpracować w grupie.

3. CELE KSZTAŁCENIA

W wyniku realizacji programu jednostki modułowej powinieneś umieć:

- rozróżnić podstawowe wielkości elektryczne i ich jednostki,
- scharakteryzować rodzaje źródeł energii elektrycznej,
- rozróżnić elementy obwodu elektrycznego,
- rozpoznać symbole graficzne podstawowych elementów elektrycznych i elektronicznych,
- odczytać schematy prostych układów elektrycznych i elektronicznych,
- obliczyć podstawowe wielkości elektryczne wykorzystując prawa elektrotechniki,
- scharakteryzować wymagania dotyczące bezpieczeństwa pracy przy urządzeniach elektrycznych,
- połączyć układy elektryczne i elektroniczne zgodnie ze schematem,
- zmierzyć podstawowe wielkości elektryczne w obwodach prądu stałego i przemiennego,
- opisać budowę, działanie i przeznaczenie typowych odbiorników energii elektrycznej,
- scharakteryzować typowe maszyny elektryczne,
- opisać podstawowe instalacje elektryczne i ich zabezpieczenia,
- wykonać prostą instalację oświetleniową i sprawdzić jej działanie,
- zmontować i uruchomić prosty układ sterowania silnikiem elektrycznym wraz z jego zabezpieczeniem,
- wskazać przeznaczenie podstawowych elementów elektronicznych,
- wyjaśnić działanie prostych układów elektronicznych na podstawie ich schematów,
- sprawdzić poprawność działania podstawowych układów elektronicznych,
- zastosować zasady bezpieczeństwa i higieny pracy na stanowisku pracy.

4. MATERIAŁ NAUCZANIA

4.1. Podstawowe pojęcia dotyczące obwodów elektrycznych. Elementy obwodów elektrycznych

4.1.1. Materiał nauczania

Podstawowe pojęcia z elektrotechniki

Elektrotechnika jest nauką o wytwarzaniu, przesyłaniu, transmisji i rozprowadzaniu energii elektrycznej oraz jej praktycznym wykorzystaniu we wszystkich dziedzinach ludzkiej działalności, np. w przemyśle, gospodarce rolnej, w transporcie, telekomunikacji, w pracach domowych itp. Elektryczność jako energia elektryczna należy do najbardziej efektywnych i ekonomicznych rodzajów energii. Można ją uzyskać stosunkowo łatwo z innych form energii i na odwrót – można ją łatwo zamienić na inną postać energii, np. na ciepłą (w grzejniku), na mechaniczną (w silniku elektrycznym), na świetlną (w żarówce), na chemiczną (w procesie elektrolizy), na elektromagnetyczną (w radiu i tv). Energię elektryczną można dowolnie dawkować i ekonomicznie, z niezmiernie dużą prędkością, przesyłać na bardzo duże odległości. Elektryczność uwolniła człowieka od ciężkiej pracy fizycznej, podwyższyła jego poziom życia, najbardziej przyczyniła się do ekonomicznego rozwoju wszystkich krajów świata. Umożliwiła ona dokonanie mechanizacji i automatyzacji złożonych procesów produkcyjnych i wytworzenie nowych, postępowych technik, np. przy rozwiązywaniu skomplikowanych matematyczno-logicznych problemów z pomocą układów zliczających itp.

Ładunek elektryczny – jako ładunek elektryczny należy rozumieć określoną liczbę ładunków elementarnych (niepodzielnych), ujemnych (elektronów) i dodatnich (protonów).

Pole elektryczne – jest to pole wywołane przez ładunki elektryczne i charakteryzujące się oddziaływaniem na znajdujące się w nim ładunki elektryczne lub inne obiekty o właściwościach elektrycznych, zarówno ruchome, jak i nieruchome.

Pole magnetyczne to stan przestrzeni działający tylko na poruszające się ładunki elektryczne lub poruszające się ciała obdarzone ładunkiem elektrycznym.

Prąd elektryczny – w elektrotechnice mamy dwie definicje prądu:

1. Jest to zjawisko uporządkowanego ruchu nośników ładunków elektrycznych w określonym środowisku pod wpływem pola elektrycznego.
2. Jest to wielkość elektryczna skalarna określona stosunkiem ładunku Q przenieszonego w ciągu czasu t przez dany przekrój poprzeczny środowiska, do tego czasu, czyli

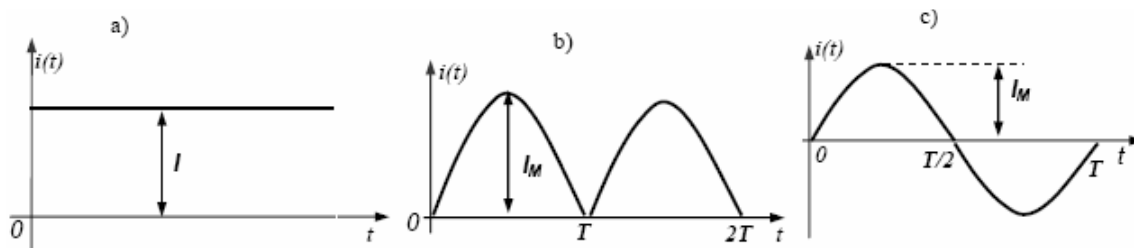
$$I = \frac{Q}{t}$$

Określa się wielkość związaną z prądem elektrycznym tzw. gęstość prądu, oznaczaną literą „ J ” i mierzona w $[A/m^2]$. Gęstością prądu elektrycznego nazywamy stosunek natężenia prądu w przewodniku do powierzchni przekroju przewodnika, przez którą przepływa ten prąd.

$$J = \frac{I[A]}{S[m^2]}$$

Zależnie od zmian wartości prądu w funkcji czasu wyróżnia się:

- prąd stały – jego wartość nie ulega zmianie w kolejnych chwilach czasowych (rys. 1a),
- prąd zmienny – jeśli w kolejnych chwilach czasowych zmienia on swoją wartość a nie zmienia znaku (rys. 1.b),
- prąd przemienny – jeśli w kolejnych chwilach czasowych zmienia on swoją wartość i kierunek przepływu (rys. 1c).



Rys. 1. Przebiegi czasowe prądu: a) stałego, b) zmiennego w czasie, c) przemiennego, sinusoidalnego
[opracowanie własne]

Jeżeli wartość przebiegu powtarza się po czasie $t = T$ to przebieg taki nazywamy okresowym a T jego okresem podstawowym.

Prąd może przepływać w różnych środowiskach. Środowiska, w których może przepływać prąd są następujące:

- przewodniki pierwszego rodzaju, do których zalicza się metale i ich stopy. Spośród metali najlepszymi przewodnikami są srebro (Ag) i miedź (Cu),
- przewodniki drugiego rodzaju, elektrolity którymi są np. wodne roztwory kwasów, zasad i soli,
- półprzewodniki, do których zalicza się substancje krystaliczne, które pod względem zdolności przewodzenia prądu zajmują miejsce pośrednie pomiędzy przewodnikami a dielektrykami (materiałami nie przewodzącymi prądu),
- gazy (stan skupienia materii, w którym cząsteczki nie są wzajemnie powiązane siłami przyciągania i poruszają się swobodnie, wypełniając dostępną im objętość),
- próżnię (obszar wolny od cząstek materialnych lub wypełniony gazem o znikomym niskim ciśnieniu w stosunku do ciśnienia atmosferycznego).

W zależności od zjawisk zachodzących w środowisku, w którym odbywa się przepływ prądu, wyróżniamy prądy:

- przewodzenia, to prąd utworzony przez elektrony swobodne lub jony przemieszczające się pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego,
- przesunięcia, występujący w dielektrykach podczas zmian pola elektrycznego, polegający na przemieszczaniu się ładunków dodatnich i ujemnych wewnątrz cząsteczek, bez naruszania struktury atomowej materii,
- unoszenia, zwany prądem konwekcji. Tworzą go przemieszczające się ładunki elektryczne nie związane z cząstkami środowiska, w którym ładunki poruszają się pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. Przykładami prądów unoszenia są: strumień elektronów w próżni, prąd nośników ładunków elektrycznych przenoszonych w półprzewodnikach,
- dyfuzyjny, polegający na przemieszczaniu się ładunków elektrycznych w wyniku zjawiska dyfuzji (przemieszczania się nośników z obszaru o większym zagęszczeniu do obszaru uboższego w nośniki ładunku). O prądach dyfuzyjnych mówi się podczas wyjaśniania zjawisk zachodzących w elementach półprzewodnikowych.

Z względu na przydatność danego ciała do przewodzenia prądu elektrycznego materiały stosowane w elektrotechnice dzieli się na trzy grupy:

- przewodniki – ciała dobrze przewodzące prąd elektryczny; zalicza się do nich: metale, ich stopy, węgiel w postaci grafitu (zaliczane do przewodników pierwszego rodzaju); elektrolity (zalicza się je do przewodników drugiego rodzaju),
- izolatory (dielektryki) – ciała praktycznie nie przewodzące prądu elektrycznego: zalicza się do nich porcelanę, szkło w stanie stałym, większość tworzyw sztucznych, oleje mineralne, niejonizowane gazy, próżnię,
- półprzewodniki – to ciała o właściwościach pośrednich w stosunku do przewodników i izolatorów. Półprzewodnikami są krzem (Si), german (Ge) oraz niektóre tlenki metali.

Podstawowe pojęcia dotyczące obwodów elektrycznych

Obwód elektryczny tworzą elementy połączone ze sobą w taki sposób, że istnieje, co najmniej jedna droga umożliwiająca przepływ prądu.

Schemat jest odwzorowaniem graficznym obwodu, w którym podano sposób połączenia elementów, a same elementy są przedstawione przy użyciu symboli graficznych.

W elementach obwodu zachodzą trzy rodzaje procesów energetycznych: wytwarzanie energii elektrycznej, akumulacja energii, rozpraszanie energii. Elementy obwodu dzielimy na:

- elementy pasywne, zwane też biernymi, odbiornikowymi,
- elementy aktywne, zwane źródłowymi,
- elementy liniowe to takie elementy, które mogą być opisane równaniami algebraicznymi liniowymi,
- elementy nieliniowe to takie elementy, które opisane są za pomocą równań algebraicznych nieliniowych.

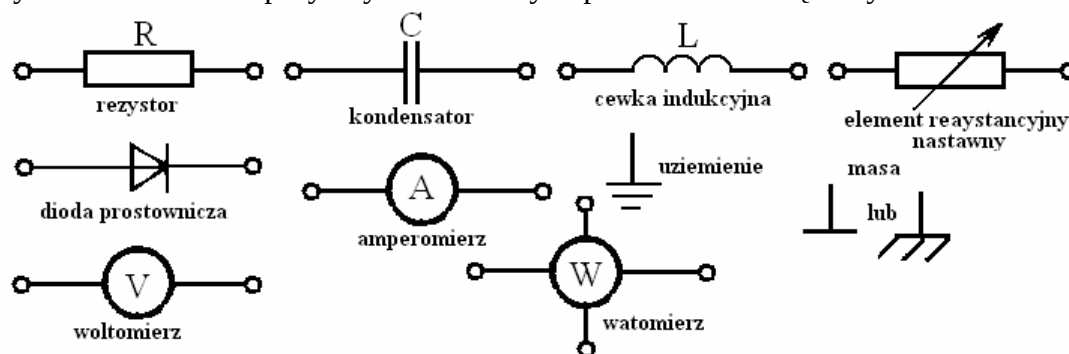
Elementy pasywne

Rezystor zwany również opornikiem, jest dwójnikiem pasywnym rozpraszającym, w którym zachodzi proces zamiany energii elektrycznej na ciepłą (rys. 2).

Cewka zwana również induktorem jest dwójnikiem pasywnym zachowawczym, zdolnym do gromadzenia energii w polu magnetycznym (rys. 2).

Kondensator jest dwójnikiem pasywnym zachowawczym, zdolnym do gromadzenia energii w polu elektrycznym (rys. 2).

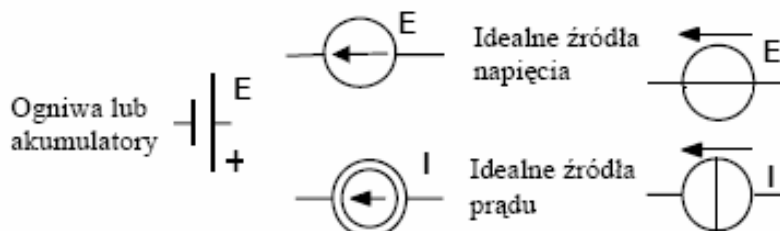
Symbole elementów pasywnych odbiorczych przedstawione są na rys. 2.



Rys. 2. Symbole graficzne wybranych elementów i przyrządów stosowanych w obwodach elektrycznych [opracowanie własne]

Elementy aktywne źródłowe

Symbole elementów źródłowych pokazane są na rys. 3.



Rys. 3. Symbole graficzne źródeł napięcia i prądu [opracowanie własne]

Gałęzią obwodu nazywamy taki odcinek obwodu, w którym prąd w dowolnej chwili ma tę samą wartość.

Węzłem obwodu nazywamy taki punkt, w którym łączą się, co najmniej trzy gałęzie.

Oczkiem lub konturem nazywamy zbiór gałęzi tworzących zamkniętą drogę dla przepływu prądu o takiej właściwości, że po usunięciu dowolnej gałęzi pozostałe nie tworzą drogi zamkniętej.

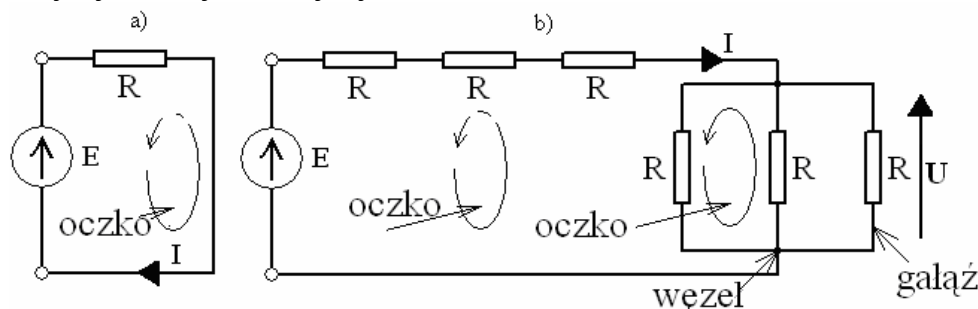
Obwód elektryczny nierozgałęziony zawiera tylko jedno oczko (rys. 4a).

Obwód elektryczny rozgałęziony składa się z kilku oczek i bywa nazywany układem elektrycznym albo siecią elektryczną (rys. 4b).

Połączenie szeregowe gałęzi charakteryzuje się tym, że przez wszystkie gałęzie układu szeregowego płynie ten sam prąd I (rys. 4b).

Połączenie równoległe gałęzi charakteryzuje się tym, że wszystkie gałęzie znajdują się pod tym samym napięciem U (rys. 4b).

Podane wyżej definicje ilustruje rys. 4.



Rys. 4. Schematy obwodów a) nierozgałęzionego, b) rozgałęzionego [opracowanie własne]

4.1.2. Pytania sprawdzające

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

1. Czym zajmuje się elektrotechnika?
2. Co to jest: ładunek elementarny, ładunek elektryczny, pole elektryczne, pole magnetyczne?
3. Jak dzielimy materiały pod względem właściwości elektrycznych?
4. Co to jest prąd elektryczny? Wymień dwie definicje prądu.
5. Co to jest gęstość prądu elektrycznego?
6. Jaki prąd nazywamy stałym, zmiennym, a jaki przemiennym? Narysuj te przebiegi.
7. Co to jest wartość chwilowa prądu?
8. Jakie właściwości elektryczne posiadają gaz, próżnia, metal?
9. Co to jest przewodnik, izolator, półprzewodnik?
10. Co to jest obwód elektryczny?
11. Co to są: węzeł, gałąź i oczko obwodu elektrycznego?
12. Co to jest obwód nierozgałęziony, rozgałęziony?
13. Jakimi symbolami oznaczamy rezystory, cewki, kondensatory, źródła napięcia, źródła prądu?

4.1.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz wartość prądu w przewodzie, jeżeli przez przekrój poprzeczny przewodu w czasie $t = 10$ s przepływa $5 \cdot 10^{18}$ elektronów. Ładunek elektronu $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odszukać wzory,

- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą podstawowych praw obwodów elektrycznych.

Ćwiczenie 2

Oblicz natężenie prądu i gęstość prądu w przewodzie o przekroju $S = 3 \text{ mm}^2$, przez który przepływa $4 \cdot 10^{20}$ elektronów w czasie $t = 2 \text{ s}$. Ładunek elektronu $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą podstawowych praw obwodów elektrycznych.

Ćwiczenie 3

Oblicz, jaki ładunek przepłynie przez przekrój poprzeczny przewodu w czasie $t = 30 \text{ s}$, jeżeli wartość prądu w tym czasie narastała liniowo od 0 do 8 A. Wykonaj rysunek.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą podstawowych praw obwodów elektrycznych.

Ćwiczenie 4

Dokonaj pomiaru rezystancji rezystorów dostępnych w twojej pracowni przy pomocy omomierza cyfrowego (metodą pomiaru bezpośredniego).

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odczytać z kart katalogowych parametry kilku rezystorów: rezystancję $R_N [\Omega]$, moc znamionową $P_N [\text{W}]$, tolerancję rezystancji $\Delta R [\%]$ i zapisać je na kartce,
- 2) wyliczyć w jakich granicach zawierają się wartości rezystancji tych rezystorów,

- 3) dokonać pomiarów rezystancji badanych oporników omomierzem i porównać z obliczeniami wykonanymi w punkcie 2.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- oporniki, potencjometry różnej mocy, karty, informacje katalogowe oporników, potencjometrów, omomierze analogowy i cyfrowy.

4.1.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

1) zdefiniować pojęcia:

- ładunek elektryczny?
- pole elektryczne?
- pole magnetyczne?
- ładunek elementarny?

2) zdefiniować prąd elektryczny?

3) zdefiniować gęstość prądu i podać jednostkę?

4) zdefiniować prąd stały, zmienny, przemienny i narysować przykłady ich przebiegów czasowych?

5) wyjaśnić, co to jest obwód elektryczny?

6) rozpoznać symbole rezystora, cewki, kondensatora, idealnego źródła napięcia, idealnego źródła prądu?

7) zdefiniować węzeł obwodu, gałąź obwodu, oczko obwodu?

8) rozpoznać symbole amperomierza, woltomierza, watomierza?

Tak

Nie

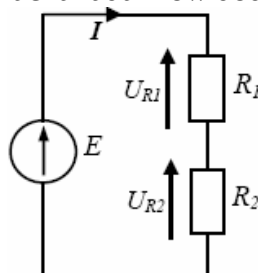
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐

4.2. Prawa obwodów elektrycznych prądu stałego. Sposoby strzałkowania prądów i napięć

4.2.1. Materiał nauczania

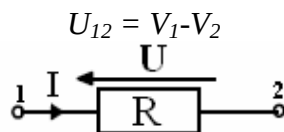
Strzałkowanie prądów i napięć

Strzałkę oznaczającą biegunowość napięcia źródła rysujemy w taki sposób, że grot strzałki jest zwrócony do zacisku (+) (rys. 5). Strzałkę określającą biegunowość napięcia odbiornikowego rysujemy tak, aby grot strzałki wskazywał punkt o wyższym potencjale. Strzałkę zwrotu prądu rysujemy od zacisku o potencjale wyższym do zacisku o potencjale niższym, czyli zgodny z kierunkiem ruchu ładunków dodatnich.



Rys. 5. Strzałkowanie napięć i prądów w obwodzie elektrycznym [opracowanie własne]

Napięcie elektryczne to różnica potencjałów pomiędzy punktami obwodu elektrycznego (rys. 6).



Rys. 6. Oznaczanie napięcia i prądu rezystora [opracowanie własne]

Prawa obwodów elektrycznych

Prawo Ohma:

Natężenie prądu I płynącego w oporniku o rezystancji R jest wprost proporcjonalne do wartości napięcia U , a odwrotnie proporcjonalne do rezystancji R .

Zapišemy to przy pomocy równania:

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

Uogólnione prawo Ohma stwierdza, że w obwodzie nierozgałęzionym o większej liczbie źródeł i oporników natężenie prądu jest wprost proporcjonalne do wypadkowej wartości napięcia w obwodzie i odwrotnie proporcjonalne do sumy rezystancji w obwodzie (łącznie z oporami wewnętrznymi źródeł). Rezystancja R opornika (rezystora) jest wielkością fizyczną zależną od materiału przewodzącego, z którego wykonany jest opornik. Jednostką rezystancji jest $[\Omega]$ – Ohm (om).

Wartość rezystancji przewodników lub oporników zależna jest od rodzaju materiału, z którego wykonano przewodnik, od długości l przewodnika oraz od powierzchni S jego przekroju, czyli:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma \cdot S}$$

gdzie ρ [$\Omega \cdot m$] – rezystywność właściwa materiału, $\gamma = \frac{1}{\rho} \left[\frac{S}{m} \right]$ oznacza konduktywność materiału.

Konduktancja, oznaczana literą G , powiązana z rezystancją R następująco: $G = 1/R$. Jednostką konduktancji jest 1S (simens). $1S = 1/\Omega$.

Rezystancja przewodników zależy od temperatury zgodnie ze wzorem:

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

gdzie:

R_0 – rezystancja opornika w temperaturze T_0 ,

α – współczynnik temperaturowy rezystancji materiału. Ponieważ $\alpha > 0$, ze wzrostem temperatury rezystancja przewodnika rośnie.

I Prawo Kirchhoffa (prądowe)

Dotyczy ono bilansu prądów w węźle obwodu elektrycznego (rys. 7): suma prądów wpływających do węzła jest równa sumie prądów odpływających od węzła.

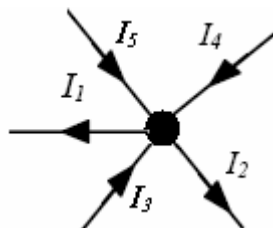
$$I_3 + I_4 + I_5 = I_1 + I_2 \quad \text{lub}$$

$$I_5 + I_4 + I_3 - I_1 - I_2 = 0, \text{ co można zapisać } \sum I_k = 0$$

gdzie: k – liczba gałęzi.

Dla każdego węzła obwodu elektrycznego, algebraiczna suma prądów jest równa zero.

Prądy wpływające do węzła zapisujemy ze znakiem (+) (I_3, I_4, I_5), a wypływające ze znakiem (-) (I_1, I_2).



Rys. 7. Węzeł obwodu elektrycznego z oznaczonymi prądami w gałęziach [opracowanie własne]

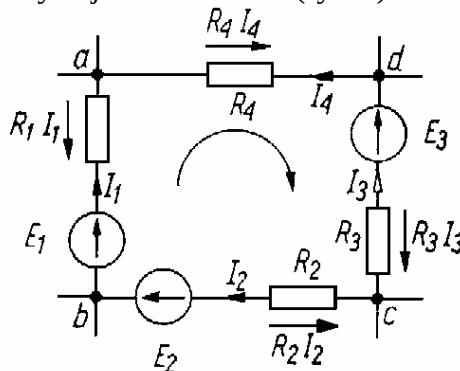
II Prawo Kirchhoffa (napięciowe)

Suma napięć źródłowych w dowolnym oczku obwodu elektrycznego prądu stałego jest równa sumie iloczynów rezystancji i prądów w gałęziach należących do danego oczka.

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_4 = E_1 + E_2 - E_3, \quad \sum(RI) = \sum E \quad \text{albo}$$

$$E_1 - R_1 I_1 + E_2 - R_2 I_2 - E_3 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = 0, \quad \sum(RI) + \sum E = 0, \text{ czyli}$$

W dowolnym oczku obwodu elektrycznego prądu stałego suma algebraiczna napięć źródłowych i napięć odbiornikowych jest równa zero (rys. 8).



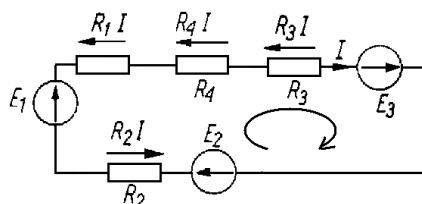
Rys. 8. Wyodrębnione oczko obwodu elektrycznego [opracowanie własne]

Dla zapisania II prawa Kirchhoffa w postaci równania przyjmujemy pewien (dowolny) zwrot obiegu oczka, oznaczony strzałką wewnątrz oczka, za dodatni. Jeśli zwrot napięcia

źródła lub odbiornika jest zgodny z tą strzałką, to te napięcia przyjmujemy jako dodatnie. Jeśli zaś zwroty napięć są przeciwne do kierunku obiegowego, to znaki napięcia źródła lub odbiornika przyjmujemy w równaniu jako ujemne. Przy takich założeniach zostały zapisane powyższe równania.

Szeregowe łączenie źródeł napięcia

Rozpatrzmy obwód nierozgałęziony, czyli obwód jednooczkowy, zawierający elementy źródłowe, reprezentowane przez źródła o napięciach E_1, E_2, E_3 oraz elementy odbiorcze, reprezentowane przez rezystory o rezystancjach R_1, R_2, R_3, R_4 (rys. 9).



Rys. 9. Obwód nierozgałęziony z trzema źródłami napięcia i czterema rezystorami [opracowanie własne]

Wszystkie elementy obwodu są połączone szeregowo, ponieważ przez wszystkie elementy przepływa ten sam prąd elektryczny I . Zgodnie z zaznaczonym zwrotem obiegu oczka napiszemy drugie prawo Kirchhoffa:

$$E_1 + E_2 + E_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I + R_4 I \quad \text{lub} \quad E_1 + E_2 + E_3 = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) I$$

$$\text{Prąd w obwodzie } I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

Jak widać wartość prądu w obwodzie zależy od sumy napięć źródłowych w obwodzie i sumy rezystancji. Jeżeli obwód szeregowy zawiera n źródeł o napięciach $E_1, E_2, \dots, E_n$, to można je zastąpić jednym źródłem o napięciu E takim, że

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{j=1}^n E_j$$

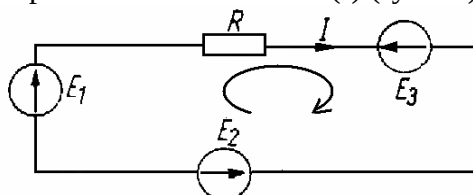
gdzie: $j = 1, 2, 3, \dots, n$ liczba źródeł napięcia w obwodzie.

Jeżeli obwód zawiera m rezystorów o rezystancjach $R_1, R_2, \dots, R_m$, to

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_m = \sum_{j=1}^m R_j$$

gdzie: $j = 1, 2, 3, \dots, m$ liczba rezystorów w obwodzie.

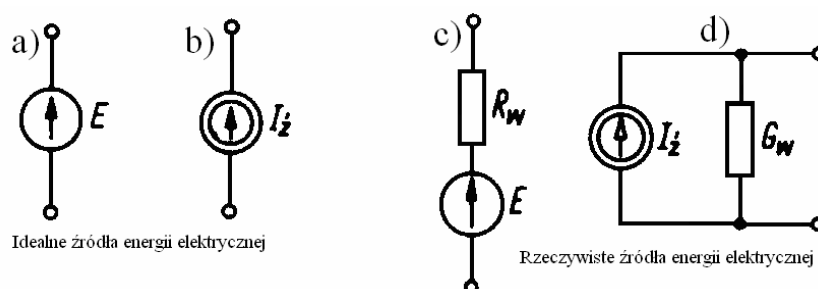
Jeżeli strzałki napięć źródłowych są zgodne ze zwrotem obiegu obwodu, to napięcia E bierzemy ze znakiem (+), jeżeli przeciwnie ze znakiem (-) (rys. 10).



Rys. 10. Obwód nierozgałęziony zawierający dwa źródła napięcia E_2 i E_3 , których strzałki napięć mają zwroty przeciwne do zwrotu obiegu obwodu: $E = E_1 - E_3 - E_2$ [opracowanie własne]

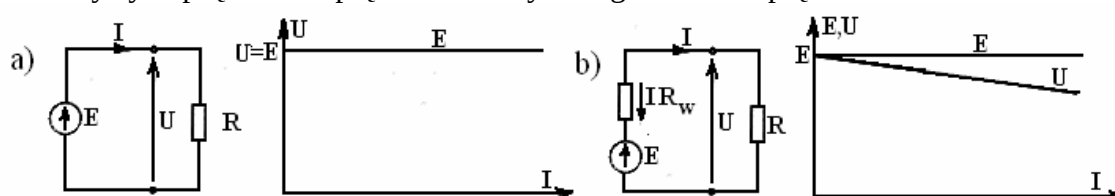
Schematy zastępcze i stany pracy źródeł energii elektrycznej

Każde rzeczywiste źródło energii elektrycznej napięciowe (prądowe) oprócz idealnego źródła napięciowego E (rys. 11a), (prądowego I_z rys. 11b) zawiera rezystancję wewnętrzną R_w (rys. 11c), (konduktancję wewnętrzną G_w (rys. 11d).



Rys. 11. Schematy źródeł energii elektrycznej: a), b) idealne; c), d) rzeczywiste [opracowanie własne]

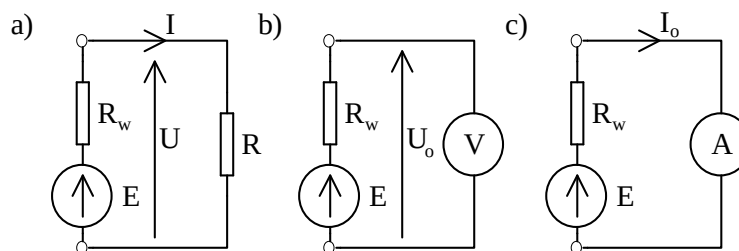
Na rys. 12 pokazano źródła napięcia i ich charakterystyki: a) obwód elektryczny i charakterystyka prądowo-napięciowa idealnego źródła napięcia b) obwód elektryczny i charakterystyka prądowo-napięciowa rzeczywistego źródła napięcia.



Rys. 12. Źródła napięcia i ich charakterystyki prądowo-napięciowe [opracowanie własne]

Stan jałowy i stan zwarcia źródła napięcia

Na zaciskach rzeczywistego źródła napięcia o parametrach E , R_w napięcie U wynosi $U = E - R_w \cdot I$



Rys. 13. Rzeczywiste źródło napięcia: a) obciążone; b) w stanie jałowym; c) w stanie zwarcia [opracowanie własne]

Stan obciążenia źródła jest to stan, w którym źródło zasila odbiorniki. Napięcie mierzone na zaciskach źródła jest mniejsze od jego siły elektromotorycznej o spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej (patrz wzór wyżej). Prąd obciążenia źródła zależy od rezystancji R , którą możemy zmieniać w bardzo szerokich granicach od $R = 0$ (stan zwarcia źródła napięcia) do $R = \infty$ (stan jałowy źródła napięcia).

Stan jałowy źródła napięcia jest to stan, w którym prąd płynący przez źródło jest równy zero (rys. 13b). Napięcie na zaciskach źródła napięcia w stanie jałowym nazywane napięciem stanu jałowego jest równe jego napięciu źródłowemu (siły elektromotorycznej). Podstawiając we wzorze

$$U = E - R_w \cdot I, \quad I = 0 \quad \text{otrzymamy} \quad U_0 = E$$

Stan zwarcia źródła napięcia jest to stan, w którym napięcie na zaciskach źródła jest równe zero. Wówczas prąd pobierany ze źródła, zwany prądem zwarcia wynosi

$$I_z = \frac{E}{R_w} = \frac{U_0}{R_w}$$

Rezystancja wewnętrzna źródła napięcia jest równa ilorazowi napięcia stanu jałowego i prądu zwarcia

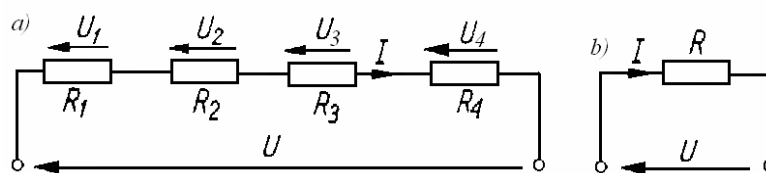
$$R_w = \frac{U_0}{I_z}$$

Prąd I w obwodzie można wyrazić za pomocą napięcia stanu jałowego i prądu zwarcia, zgodnie z poniższym wzorem

$$I = \frac{U_0}{R + \frac{U_0}{I_z}}$$

Szeregowe połączenie rezystorów

Układ czterech szeregowo połączonych rezystorów R_1, R_2, R_3, R_4 przedstawiony na rys. 14a chcemy zastąpić jednym równoważnym rezystorem R (rys. 13b), przy czym prąd I i napięcie U nie mogą ulec zmianie.



Rys. 14. Szeregowe połączenie: a) czterech oporników
b) opornik zastępczy [opracowanie własne]

Zgodnie z II prawem Kirchhoffa mamy (rys. 14a):

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4$$

Korzystając z prawa Ohma mamy:

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 + IR_4 = I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

Dzieląc obie strony równania otrzymujemy:

$$\frac{U}{I} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Korzystając z prawa Ohma dla obwodu z rys. 13b mamy:

$$U = IR \text{ a stąd } \frac{U}{I} = R \text{ czyli}$$

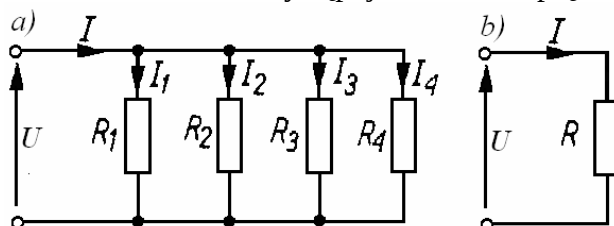
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Rezystancja zastępcza układu szeregowego kilku oporników jest równa sumie rezystancji poszczególnych oporników. Wzór ten możemy uogólnić na dowolną liczbę oporników połączonych szeregowo:

$$R = \sum_{k=1}^n R_k$$

Równoległe połączenie rezystorów

Połączeniem równoległym kilku gałęzi w obwodzie elektrycznym nazywamy takie połączenie, w którym na zaciskach elementów występuje to samo napięcie (rys. 15).



Rys. 15. Układ równoległy: a) czterech oporników b) jego schemat zastępczy [opracowanie własne]

Prąd I w gałęzi głównej zgodnie z I prawem Kirchhoffa jest równy:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

Zgodnie z prawem Ohma

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \frac{U}{R_4}.$$

Dzieląc równanie stronami przez U , otrzymujemy

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

Odwrotność rezystancji zastępczej układu równoległego czterech oporników jest równa sumie odwrotności ich rezystancji. Ogólnie dla dowolnej liczby oporników:

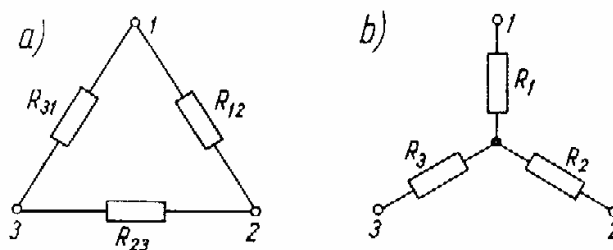
$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$$

Konduktancja ($G=1/R$) zastępcza układu równoległego n oporników jest równa sumie konduktancji poszczególnych oporników:

$$G = \sum_{k=1}^n G_k$$

Połączenia rezystorów w gwiazdę i trójkąt

Oprócz połączenia szeregowego i równoległego rezystorów, rezystory są połączone w gwiazdę i trójkąt co pokazane jest na rys. 16. Podamy wzory na zamianę połączenia rezystorów w gwiazdę na połączenie ich w trójkąt oraz na zamianę połączenia rezystorów w trójkąt na połączenie ich w gwiazdę.



Rys. 16. Połączenie rezystorów: a) w trójkąt; b) w gwiazdę [opracowanie własne]

Zamiana trójkąta w gwiazdę

Rezystancja gałęzi gwiazdy równoważnej trójkątowi jest równa iloczynowi rezystancji gałęzi trójkąta wychodzących z tego samego węzła, podzielonemu przez sumę rezystancji trójkąta.

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_2 = \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_3 = \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

Zamiana gwiazdy w trójkąt

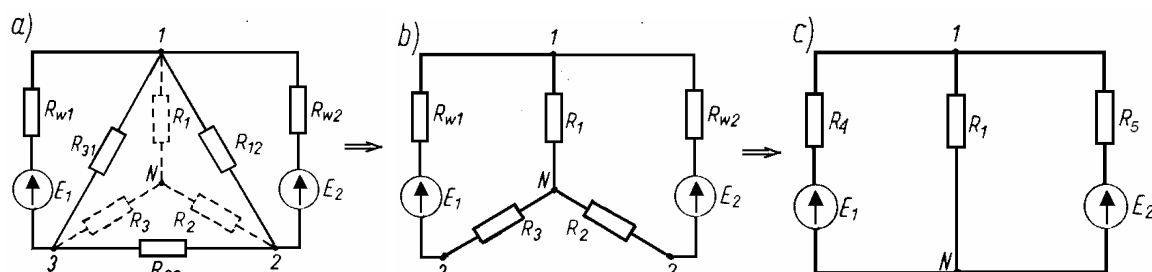
Rezystancja gałęzi trójkąta jest równa sumie rezystancji gałęzi gwiazdy (zbiegających się w tej samej parze węzłów) plus iloczyn tych rezystancji gwiazdy, podzielony przez rezystancję trzeciej gałęzi gwiazdy.

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2}$$

Na rys. 17 pokazano kolejne etapy przekształcania trójkąta w gwiazdę



Rys. 17. Przekształcanie trójkąta w gwiazdę: a) schemat obwodu początkowego z elementami połączonymi w trójkąt; b) schemat obwodu po przekształceniu trójkąta w gwiazdę; c) ostateczny schemat obwodu [opracowane własne]

Energia prądu elektrycznego

Przy przeniesieniu ładunku elektrycznego Q między dwoma punktami o różnicy potencjałów (napięciu) U zostaje wykonana praca:

$$W = U Q$$

Jak pamiętamy ładunek Q przenoszony przez prąd stały o natężeniu I w czasie t wyraża się wzorem:

$$Q = I t$$

Energia elektryczna pobrana w czasie t przez odbiornik o rezystancji R wynosi:

$$W = U I t$$

Energia ta wydzielą się na rezystorze w postaci ciepła. Jednostką energii jest 1 dżul (1J), równanie jednostek ma postać:

$$[W] = [U] [I] [t] = V \cdot A \cdot s = W \cdot s = J$$

Korzystając z prawa Ohma możemy zapisać wzór na energię elektryczną następująco:

$$W = UI t = I R I = I^2 R t$$

lub

$$W = UI t = U \frac{U}{R} t = \frac{U^2}{R} t$$

Powszechnie używaną jednostką energii elektrycznej jest kilowatogodzina kWh

$$1kWh = 1000 Wh = 1000 W \cdot 3600s = 3\,600\,000 Ws$$

Moc elektryczna

Stosunek energii prądu elektrycznego do czasu nazywamy mocą elektryczną i oznaczamy literą P

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UI t}{t} = UI$$

Jak wynika ze wzoru moc elektryczna jest równa iloczynowi napięcia U i prądu I . Jednostką mocy elektrycznej jest 1 wat ($1W = 1A \cdot 1V$). Większe jednostki to 1 kW (jeden kilowat), 1 MW (jeden megawat).

Korzystając z prawa Ohma możemy przedstawić moc elektryczną prądu stałego w postaci

$$P = UI = IRI = I^2 R \quad \text{lub} \quad P = UI = U \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

$$\text{czyli} \quad P = I^2 R \quad \text{lub} \quad P = \frac{U^2}{R}$$

Prawo Joule'a-Lenza

Równanie $W = RI^2 t$ wyraża prawo Joule'a-Lenza, zgodnie z którym energia elektryczna przekształcana w odbiorniku rezystancyjnym w ciepło jest wprost proporcjonalna do rezystancji R odbiornika, do kwadratu prądu I i czasu t .

Przemiany energii elektrycznej – rodzaje odbiorników

Energia elektryczna może być przekształcana w różne rodzaje energii:

1. Energia cieplna (co wyżej zostało opisane); efekt ten wykorzystywany jest w gospodarstwach domowych i w niektórych gałęziach przemysłu np. przy wytopie stali szlachetnych i metali kolorowych (nieżelaznych), w produkcji aluminium, w obróbce cieplnej stali itp. Urządzenia grzejne przemysłowe (piece łukowe, oporowe, promiennikowe, itp.) będą opisane w rozdziale „Urządzenia grzejne oraz źródła światła”. Urządzenia grzejne stosowane w obiektach nieprzemysłowych (gospodarstwa domowe, szkoły, szpitale, hotele itp.) to przeważnie urządzenia rezystancyjne:
 - kuchenki elektryczne,
 - żelazka do prasowania, suszarki do włosów, poduszki elektryczne,
 - bojlerzy czyli warniki,
 - piekarniki elektryczne,
 - elektryczne naczynia grzejne – czajniki, garnki, patelnie,
 - grzałki nurkowe do zanurzania w wodzie przeznaczonej do zagrzania lub zagotowania.

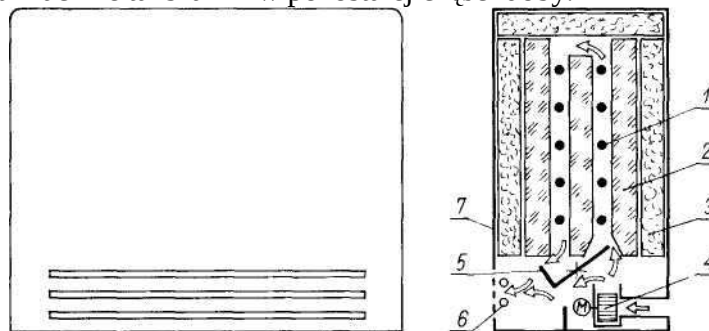
Kuchenki elektryczne stosowane w gospodarstwach domowych to urządzenia z piekarnikami o mocy 4÷10 kW, jedno- lub trójfazowe. Regulacji poboru mocy i temperatury dokonuje się przez załączanie, wyłączanie lub zmianę układu połączeń elementów grzejnych rezystancyjnych, najczęściej za pomocą przełączników ręcznych. Coraz bardziej rozpowszechnione są również kuchnie mikrofalowe.

Piece (grzejniki) elektryczne przeznaczone do ogrzewania pomieszczeń nieprzemysłowych to urządzenia rezystancyjne o działaniu bezpośrednim lub urządzenia akumulacyjne.

Grzejniki o działaniu bezpośrednim są wytwarzane o niewielkich mocach znamionowych, przeważnie do 2 kW, z wymuszonym obiegiem ciepłego powietrza jako urządzenia przenośne, rzadziej do montowania na stałe. Służą najczęściej do szybkiego ogrzania (dogrzania) pomieszczeń w chłodnych dniach i porach roku, gdy podstawowe ogrzewanie jest nieczynne, lub, gdy z dowolnych innych przyczyn użytkownik uzna za właściwe dogrzanie pomieszczenia. Grzejniki o działaniu bezpośrednim mają najczęściej skokową regulację poboru mocy przez zmianę liczby włączonych elementów grzejnych. Niektóre jednak konstrukcje mogą być wyposażone w programowalne sterowniki elektroniczne pozwalające na ciągłą regulację poboru mocy oraz nastawianie czasów pracy i wyłączenia grzejnika.

Grzejniki przenośne o działaniu bezpośrednim są zasilane na ogół z obwodów gniazd wtyczkowych i nie wpływają na sposób wykonania instalacji elektrycznych.

Do ogrzewania budynków całkowicie zelektryfikowanych, budynków niewyposażonych w instalacje centralnego ogrzewania, a również budynków jednorodzinnych itp., są stosowane przeważnie piece akumulacyjne, wyposażone często w dodatkowe elementy grzejne o działaniu bezpośrednim (rys. 18). Piece akumulacyjne przeznaczone są do pracy (poboru energii) w godzinach nocnych ($22^{00} \div 6^{00}$), kiedy to energia elektryczna jest znacznie tańsza niż w pozostałej części doby.



Rys. 18. Piec elektryczny akumulacyjny: 1 – elementy grzewcze, 2 – płyty ceramiczne akumulujące ciepło, 3 – izolacja cieplna, 4 – wentylator, 5 – kłapa sterowana automatycznie, 6 – elementy grzejne ogrzewania bezpośredniego, 7 – obudowa stalowa o uszlachetnionej powierzchni [opracowanie własne]

Energia elektryczna przetworzona na ciepło jest akumulowana w blokach ceramicznych otaczających elementy grzejne. Zmagazynowanie znacznych ilości energii jest możliwe, gdyż masa jednostkowa pieców akumulacyjnych jest stosunkowo duża, wynosi, bowiem $40 \div 50 \text{ kg/kW}$.

Piece akumulacyjne są wytwarzane jako jedno- i trójfazowe o mocy znamionowej $1,0 \div 7,5 \text{ kW}$. Umożliwiają one zakumulowanie energii $8 \div 56 \text{ kWh}$ podczas ok. 8 h pracy pieca. Energia ta jest oddawana do otoczenia w pozostałej części dnia, utrzymując temperaturę w ogrzewanym pomieszczeniu w pożądanym zakresie.

2. Energia mechaniczna – silnik elektryczny – urządzenie zamieniające energię elektryczną na energię mechaniczną. Najczęściej stosowane silniki elektryczne to silniki prądu przemiennego takie jak: asynchroniczne, synchroniczne, komutatorowe, liniowe. Ze względu na liczbę faz uzwojenia (silniki prądu przemiennego): jednofazowe, trójfazowe. Najszersze zastosowanie w rolnictwie mają silniki asynchroniczne, które spotyka się w wykonaniu trójfazowym i jednofazowym.
3. Energia świetlna – są to lampy elektryczne takie jak: żarówki, lampy fluorescencyjne (światłówki), lampy wyładowcze: sodowe i rtęciowe, lampy jarzeniowe wysokonapięciowe, lampy ksenonowe, lampy łukowe.

4. Energia chemiczna – powstającą w wyniku elektrolizy. Takie substancje chemiczne, jak kwasy, zasady oraz sole ulegają w wodzie dysocjacji jonowej – jest to rozpad cząsteczek jony dodatnie (kationy, obdarzone ładunkiem dodatnim) oraz jony ujemne (aniony, posiadają one ładunek ujemny). Te jony następnie mogą służyć jako nośniki prądu elektrycznego; wykorzystuje się je do konstrukcji ogniw i akumulatorów. Elektroliza wykorzystywana jest także do: otrzymywania czystej miedzi zwanej miedzią elektrolityczną, powlekania cienką warstwą metalu (chromu lub niklu) przedmiotów metalowych w celu ochrony przed korozją oraz nadania im estetycznego wyglądu.

Metody obliczania obwodów elektrycznych nierozgałęzionych i obwodów rozgałęzionych

Obliczanie (rozwiązywanie) obwodów elektrycznych polega na wyznaczaniu wartości prądów w gałęziach i napięć na elementach obwodów, których schematy połączeń oraz parametry elementów są znane. W elektrotechnice znane są różne metody obliczania obwodów. Oto kilka z nich:

- metoda przekształcania,
- metoda prądów oczkowych,
- metoda potencjałów węzłowych,
- superpozycji,
- metoda praw Kirchhoffa.

Metoda przekształcania

Obwody z jednym źródłem energii można rozwiązywać przekształcając schemat obwodu do prostszej postaci. Przekształcając schemat obwodu obowiązuje zasada: Zawsze podczas zastępowania układów przez układy równoważne musi być spełniony warunek niezmienności prądów i napięć w częściach obwodu nieobjętych przekształceniami.

Rozpatrzmy obwód przedstawiony na rys. 19a. Obwód ten składa się z trzech gałęzi. W gałęzi pierwszej mamy idealne źródło napięcia o napięciu źródłowym E (czyli przyjmujemy, że rezystancja wewnętrzna źródła jest równa zero) połączone szeregowo z rezystancją R_1 . W gałęzi drugiej występuje jeden element o rezystancji R_2 . W gałęzi trzeciej mamy dwa elementy R_3 oraz R_4 połączone szeregowo, a zatem zgodnie z zasadą połączenia szeregowego, przez obie rezystancje płynie ten sam prąd. Przystąpimy teraz do przekształcania obwodu, co wpłynie na jego uproszczenie. Korzystając ze wzoru na rezystancję zastępczą przy połączeniu szeregowym rezystorów, możemy obliczyć:

$$R_{34} = R_3 + R_4$$

W wyniku zastąpienia na schemacie dwóch rezystancji przez jedną rezystancję zastępczą, otrzymamy nowy schemat równoważny, przedstawiony na rys. 19b. W schemacie tym rezystancje R_2 oraz R_{34} są połączone równolegle, a więc korzystając ze wzoru na rezystancję zastępczą przy połączeniu równoległym rezystorów, wyznaczymy:

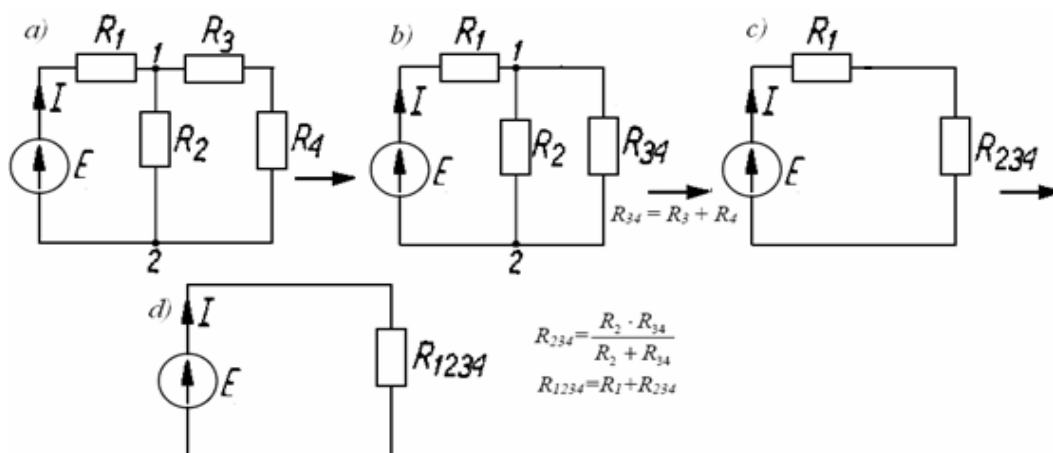
$$R_{234} = \frac{R_2 \cdot R_{34}}{R_2 + R_{34}}$$

W rezultacie otrzymamy następny schemat równoważny (rys. 19c), na którym rezystancje R_1 oraz R_{234} są połączone szeregowo. Przez obie rezystancje płynie ten sam prąd I . Zastąpimy je więc jedną rezystancją zastępczą i otrzymamy schemat równoważny, pokazany na rys. 19d.

$$R_{1234} = R_1 + R_{234}$$

W wyniku kolejnych przekształceń, obwód przedstawiony na rys. 19a zastąpiliśmy obwodem równoważnym na rys. 19d. Ponieważ w kolejnych schematach elementy były

łączone zarówno szeregowo, jak i równolegle, mówimy więc, że połączenie ma charakter mieszany. Zwróćmy jeszcze uwagę, że została przy tym zachowana zasada niezmienności prądu I , w gałęzi pierwszej, która nie podlegała przekształceniu. Obliczanie obwodu polega na wyznaczaniu wszystkich prądów w gałęziach i napięć na elementach.

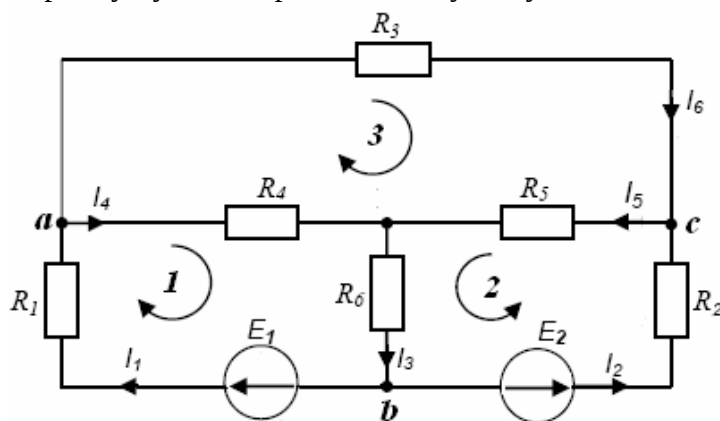


Rys. 19. Przekształcanie obwodu: a) schemat obwodu o mieszanym połączeniu elementów, b), c), d) kolejne fazy przekształcania obwodu [opracowanie własne]

Obliczanie obwodów metodą praw Kirchhoffa

Obliczanie rozptyłu prądów i rozkładu napięć w obwodzie metodą przekształcania można przeprowadzać w prosty sposób w takich obwodach, w których działa jedno źródło energii. Gdy obwód zawiera kilka gałęzi ze źródłami energii elektrycznej, wówczas stosujemy inne metody, bardziej operatywne. Wszystkie metody opierają się na dwóch prawach Kirchhoffa. Można bowiem udowodnić, że dla dowolnego obwodu elektrycznego liniowego zawierającego g gałęzi i w węzłów można wyznaczyć rozptył prądów i rozkład napięć, z tym jednak, że przy dużej liczbie gałęzi i węzłów obliczenia są bardzo kłopotliwe. Przedstawimy teraz sposób rozwiązywania obwodów rozgałęzionych z zastosowaniem pierwszego i drugiego prawa Kirchhoffa. Jeżeli dla obwodu zawierającego w węzłów napisalibyśmy, zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa, tyle równań, ile jest węzłów, to prąd każdej gałęzi wystąpi w równaniach dwukrotnie z przeciwnymi znakami, gdyż każda gałąź wiąże ze sobą dwa węzły. Okazuje się, że dla obwodu zawierającego w węzłów możemy napisać, zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa, $w-1$ równań niezależnych. Jeżeli rozpatrywany obwód ma g gałęzi, to liczba niewiadomych wynosi g , gdyż w każdej gałęzi płynie inny prąd. Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa można napisać $g - (w - 1) = g - w + 1$ równań niezależnych.

Jako przykład rozpatrzmy obwód przedstawiony na rys. 20.



Rys. 20. Schemat obwodu o sześciu gałęziach i czterech węzłach obliczany metodą praw Kirchhoffa [opracowanie własne]

Zakładamy, że dane są wszystkie napięcia źródłowe, E_1 i E_2 , oraz wszystkie rezystancje $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$. Obwód ma cztery węzły ($w = 4$) i sześć gałęzi ($g = 6$). Zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa możemy napisać $w - 1 = 4 - 1 = 3$ równania, przy czym obojętne jest dla których węzłów napiszemy te równania. Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa możemy napisać $g - w + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ równania. Łącznie napiszemy sześć równań, które pozwolą na obliczenie sześciu niewiadomych prądów. Oznaczamy prądy w gałęziach, przy czym zwroty prądów mogą być dowolne. Następnie wybieramy oczka i przyjmujemy zwroty obiegowe tych oczek, również w sposób dowolny. Piszemy równania.

Równania bilansu prądów są następujące:

$$\text{dla węzła } a \quad I_1 = I_4 + I_6$$

$$\text{dla węzła } b \quad I_3 = I_1 + I_2$$

$$\text{dla węzła } c \quad I_5 = I_2 + I_6$$

Równania bilansu napięć są następujące:

$$\text{dla oczka 1} \quad E_1 = R_1 I_1 + R_4 I_4 + R_6 I_3$$

$$\text{dla oczka 2} \quad E_2 = R_2 I_2 + R_5 I_5 + R_3 I_3$$

$$\text{dla oczka 3} \quad 0 = R_3 I_6 + R_5 I_5 - R_4 I_4$$

Z uzyskanego układu sześciu równań obliczamy sześć niewiadomych prądów, a potem spadki napięć na poszczególnych elementach.

4.2.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jakie obwody nazywamy nierozgałęzionymi, a jakie rozgałęzionymi?
2. Jakie zasady obowiązują przy oznaczaniu kierunków prądów i napięć na schematach obwodów?
3. Jak brzmi prawo Ohma dla rezystora (opornika)?
4. Jak brzmi treść I i II prawa Kirchhoffa?
5. Jak zapisujemy równania wyrażające treść I i II prawa Kirchhoffa?
6. Na czym polega rozwiązywanie obwodów elektrycznych metodą przekształcania?
7. Na czym polega rozwiązywanie obwodów elektrycznych metodą praw Kirchhoffa?
8. Czym różnią się idealne i rzeczywiste źródła napięcia i prądu?
9. Jak realizuje się stany jałowy, obciążenia, zwarcia źródła napięcia?
10. Jak wyznacza się rezystancję zastępczą rezystorów połączonych szeregowo i równolegle?
11. Co to jest energia prądu elektrycznego i jakie są jej jednostki?
12. Co to jest moc prądu elektrycznego, jakie są jej jednostki?
13. W jakie rodzaje energii może być przekształcana energia elektryczna?

4.2.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz wartość napięcia doprowadzonego do grzejnika, moc oraz ilość energii pobranej przez grzejnik w czasie 1 h, jeżeli przez grzejnik o rezystancji $R = 55 \, \Omega$ przepływa prąd $I = 4 \, \text{A}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obwodów elektrycznych.

Ćwiczenie 2

Oblicz wartość rezystancji drutu miedzianego w temperaturze $t_1 = 120^\circ\text{C}$, jeżeli rezystancja tego drutu w temperaturze $t_0 = 20^\circ\text{C}$ wynosi $200\ \Omega$, a współczynnik temperaturowy rezystancji miedzi wynosi $\alpha_T = 4 \cdot 10^{-3} 1/\text{K}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- poradnik dla ucznia,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obwodów elektrycznych.

Ćwiczenie 3

Oblicz wartość rezystancji zastępczej obwodu oraz spadki napięcia na rezystorach o rezystancji $R_1 = 20\ \Omega$ i $R_2 = 40\ \Omega$ połączonych szeregowo i przyłączonych do źródła o napięciu $U = 12\ \text{V}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

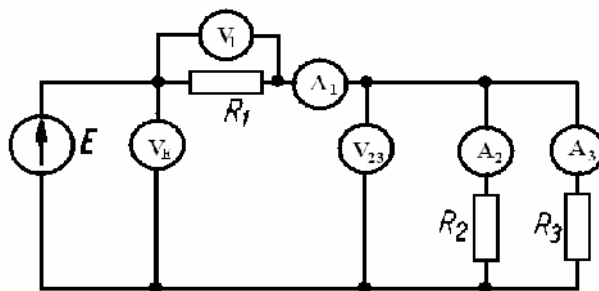
- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obwodów elektrycznych.

Ćwiczenie 4

Oblicz wartości wszystkich prądów i napięć w obwodzie. Następnie dokonaj pomiarów napięć i prądów w układzie jak na rysunku i porównaj je z obliczonymi wcześniej. Uzasadnij ewentualne rozbieżności. Wartości elementów wynoszą: $E = 20\ \text{V}$, $R_1 = 12\ \Omega$, $R_2 = 10\ \Omega$, $R_3 = 40\ \Omega$.



Rysunek do ćwiczenia 4

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinien:

- 1) zastrzałkować prądy i napięcia w obwodzie,
- 2) korzystając z metody przekształcania obwodu obliczyć prądy i napięcia,
- 3) dokonać pomiarów napięć i prądów w układzie jak na rysunku i zanotować wyniki w zeszycie,
- 4) porównać wyniki obliczeń matematycznych z wynikami pomiarów i wyjaśnić różnice jeżeli takie wystąpią.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- zasilacz z regulacją napięcia stałego $1 \div 24$ V,
- woltomierze i amperomierze cyfrowe,
- rezystory o wartościach rezystancji zgodnej z podanymi,
- przewody do połączeń obwodu,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą wykorzystania pomiarów w obwodach elektrycznych.

4.2.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) strzałkować prądy i napięcia w obwodzie?	☐	☐
2) wyjaśnić różnicę między określeniem potencjału i napięcia?	☐	☐
3) wyjaśnić prawo Ohma dla rezystora obwodu szeregowego?	☐	☐
4) wyjaśnić na czym polega metoda przekształcania w rozwiązywaniu obwodów?	☐	☐
5) określić liczbę równań prądowych i napięciowych w metodzie Kirchhoffa?	☐	☐
6) obliczyć rezystancję zastępczą rezystorów połączonych szeregowo ?	☐	☐
7) obliczyć rezystancję zastępczą rezystorów połączonych równolegle?	☐	☐
8) wyjaśnić stany pracy źródeł napięcia?	☐	☐
9) określić sposób wyznaczania oporności wewnętrznej źródła napięcia?	☐	☐
10) wyjaśnić, czy można łączyć równolegle idealne źródła napięcia?	☐	☐
11) wyjaśnić różnicę między mocą a energią prądu elektrycznego?	☐	☐
12) wyjaśnić, czego dotyczy prawo Joule'a-Lenza?	☐	☐
13) włączyć w obwód elektryczny woltomierz i amperomierz?	☐	☐
14) zmierzyć moc prądu dwoma metodami?	☐	☐
15) wyjaśnić, co to jest elektrotermia i elektroliza?	☐	☐

4.3. Obwody prądu przemiennego jednofazowego

4.3.1. Materiał nauczania

Wielkości charakteryzujące przebiegi sinusoidalnie zmienne

Prądem zmiennym nazywamy prąd, który w czasie zmienia swoją wartość liczbową.

Jeżeli prąd zmienia swoją wartość i zwrot w sposób okresowy, to taki prąd nazywamy prądem przemiennym. Wśród wielu rodzajów prądu przemiennego największe znaczenie ma prąd sinusoidalny, czyli taki, który opisany jest funkcją sinus. Wielkości sinusoidalne są jednoznacznie określone przez trzy wielkości: amplitudę, pulsację i początkowy kąt fazowy. Równanie opisujące prąd zmieniający się sinusoidalnie ma postać:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

gdzie:

I_m – amplituda, inaczej wartość maksymalna,

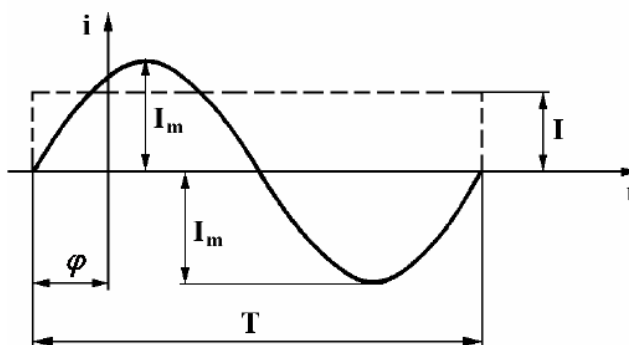
φ – faza początkowa, czyli faza danej wielkości w chwili początkowej ($t=0$),

ω – pulsacja lub częstotliwość kątowa, czyli szybkość zmiany w czasie fazy danej wielkości sinusoidalnej,

f – częstotliwość, podawana w hercach; $1\text{Hz} = 1/\text{s}$ oznacza liczbę pełnych zmian w ciągu jednej sekundy; zależność między pulsacją ω a częstotliwością f jest następująca:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

T – okres przebiegu podawany w sekundach, oznacza czas trwania jednej pełnej zmiany (cyklu) przebiegu. Okres i częstotliwość przebiegu związane są zależnością: $f = 1/T$. Oznacza to, że częstotliwość przebiegu jest równa liczbie okresów w czasie 1 sekundy. Wykres prądu sinusoidalnie zmiennego pokazany jest na rysunku 21.



Rys. 21. Wykres prądu zmieniającego się sinusoidalnie [opracowanie własne]

Wartość skuteczna prądu lub napięcia sinusoidalnego

Do oceny cieplnych skutków działania prądu przemiennego wprowadzono pojęcie wartości skutecznej prądu.

Wartością skuteczną prądu sinusoidalnego nazywamy taką, równoważną wartość prądu stałego, który przepływając przez opornik o rezystancji R , w czasie równym okresowi prądu T , spowoduje wydzielenie na tej rezystancji takiej samej ilości ciepła, co prąd sinusoidalny w tym samym czasie.

Ta definicja oparta jest na równoważności energetycznej prądu stałego i przemiennego. Wartość skuteczną prądu sinusoidalnego oznacza się literą I , podobnie jak wartość prądu stałego.

$$I_{sk} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0,707 I_m$$

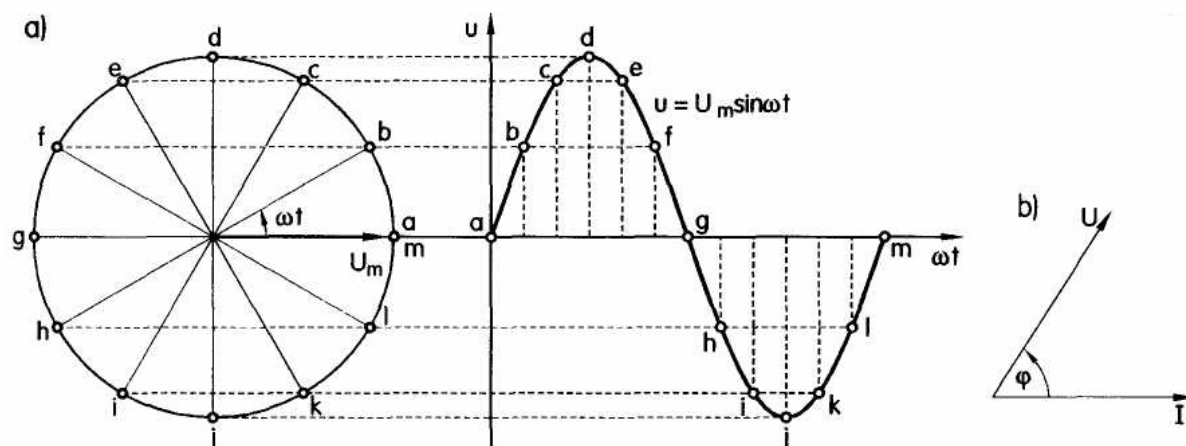
Wartość średnia półokresowa przebiegu o okresie T , to średnia arytmetyczna tego przebiegu dla połowy okresu. Wartość średnia całokresowa przebiegu sinusoidalnego jest równa zeru.

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

Wartość maksymalna (amplituda) przebiegu to największa wartość chwilowa, jaką przebieg osiąga w rozpatrywanym przedziale czasu (oznaczamy dużą literą z indeksem m), np. I_m , U_m , E_m .

Przedstawianie przebiegów sinusoidalnych za pomocą wykresów wektorowych

Wykresy czasowe napięć i prądów stają się mało przejrzyste, gdy na jednym rysunku znajduje się kilka przebiegów sinusoidalnych. Dla uniknięcia tych niedogodności w elektrotechnice wykresowi czasowemu wielkości sinusoidalnie zmiennej przyporządkowuje się umownie symbolizujący ją wektor. Jeśli wektor o długości odpowiadającej amplitudzie, np. U_m , wiruje z prędkością kątową równą pulsacji $\omega = 2\pi f$, to jego rzuty na nieruchomą oś są równe wartościom chwilowym. W ten sposób można otrzymać na wykresie czasowym przebieg sinusoidalnie zmienny $u = U_m \sin \omega t$. Ideę odwzorowania przebiegu sinusoidalnego za pomocą wirującego wektora przedstawia rys. 22.



Rys. 22. Odwzorowanie wartości napięcia sinusoidalnie zmiennego a) za pomocą wirującego wektora, b) wykres wektorowy tego napięcia [opracowanie własne]

Zasady rysowania wykresów wektorowych:

- kąt, jaki tworzy wektor z osią czasu w chwili $t = 0$ jest fazą początkową wektora,
- długości wektorów odpowiadają wartościom skutecznym (bądź maksymalnym),
- kąt między dwoma wektorami na wykresie jest równy kątowi przesunięcia fazowego,
- kąty przesunięcia fazowego odkłada się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów wskazówek zegara,
- sumowanie lub odejmowanie wektorów tych samych wielkości fizycznych odpowiada sumowaniu lub odejmowaniu przebiegów sinusoidalnych na wykresie czasowym,
- w przypadku wykresów wektorowych napięć i prądów w obwodzie szeregowym, kąt przesunięcia fazowego odkłada się od wektora prądu do wektora napięcia,
- w przypadku wykresów wektorowych napięć i prądów w obwodzie równoległym, kąt przesunięcia fazowego odkłada się od wektora napięcia do wektora prądu.

Moc i energia w obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego

Przy przebiegach sinusoidalnych rozważamy moc w dowolnej chwili i wówczas mówimy o tzw. mocy chwilowej. Jeżeli w obwodzie prądu sinusoidalnie zmiennego wartość chwilowa napięcia jest opisana zależnością $u = U_m \sin \omega t$, chwilowa wartość prądu $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$, to moc chwilowa, będąca iloczynem chwilowego napięcia i chwilowego natężenia prądu ma postać:

$$p = ui = U_m I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

Po uwzględnieniu związku pomiędzy wartościami skutecznymi i maksymalnymi przebiegów oraz po przekształceniach równanie to przyjmuje postać:

$$p = U I \cos \varphi - U I \cos(2\omega t - \varphi)$$

W mocy chwilowej występuje składnik niezależny od czasu (składowa stała mocy chwilowej) i składowa zmienna mocy o częstotliwości dwukrotnie większej od częstotliwości napięcia i prądu. Wartość składowej stałej mocy jest równa wartości średniej mocy chwilowej za okres przebiegu T i wyraża się równaniem:

$$P = U I \cos \varphi$$

gdzie φ – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem. Równanie powyższe wyraża wartość mocy czynnej prądu sinusoidalnego, $\cos \varphi$ – nazywa się współczynnikiem mocy. Jednostką mocy czynnej jest wat [W]. Jednostką energii elektrycznej jest 1 kWh = $3,6 \cdot 10^6$ J. Wartość energii elektrycznej:

$$W = P t$$

Oprócz mocy czynnej w obwodach prądu przemiennego występują również:

- a) moc bierna, której odpowiada energia magazynowana w polu elektrycznym kondensatorów lub w polu magnetycznym elementów indukcyjnych:

$$Q = U I \sin \varphi$$

Jednostką mocy biernej jest var [var].

- b) moc pozorna

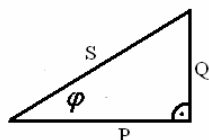
$$S = U I$$

Jednostką mocy pozornej jest woltoamper [V·A]

Między mocą czynną, bierną i pozorną zachodzą związki:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad P = S \cos \varphi \quad Q = S \sin \varphi$$

Moc czynną, bierną i pozorną można przedstawić w postaci tzw. trójkąta mocy (rys. 23). Moc bierna, może przyjmować wartość ujemną, gdy kąt fazowy φ jest ujemny, (odbiornik rezystancyjno-pojemnościowy) lub może mieć wartość dodatnią, gdy kąt fazowy φ jest dodatni (odbiornik rezystancyjnoindukcyjny).



Rys. 23. Trójkąt mocy [opracowanie własne]

4.3.2. Pytania sprawdzające

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

1. Co to jest napięcie i prąd sinusoidalny?
2. Jakie parametry opisują napięcie i prąd sinusoidalny?
3. Co to jest kąt fazowy, amplituda, okres i częstotliwość przebiegu?
4. Co to jest wartość skuteczna prądu?
5. Co nazywamy wykresem wektorowym prądu?

6. Jak wyglądają przebiegi czasowe i wykres wektorowy prądu i napięcia sinusoidalnego?
7. Jak definiuje się moc prądu przemiennego?
8. Co to jest współczynnik mocy?
9. Co to jest trójkąt mocy?

4.3.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz pulsację ω oraz okres T prądu sinusoidalnego o częstotliwości $f = 500$ Hz.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotycząca obwodów prądu przemiennego.

Ćwiczenie 2

Oblicz: a) wartości skuteczne i średnie napięcia i prądu, b) wartości chwilowe napięcia i prądu dla $t = 0,005$ s, jeżeli prąd i napięcie mają następujące przebiegi: $u = 310 \sin \omega t$ i $i = 2 \sin (\omega t - \pi/4)$. Częstotliwość $f = 50$ Hz.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotycząca obliczeń w obwodach prądu przemiennego.

Ćwiczenie 3

Sporządź wykres wektorowy napięcia i prądu dla wartości skutecznych, oblicz amplitudę napięcia i w jednym układzie współrzędnych narysuj przebiegi czasowe napięcia i prądu, oblicz moc czynną, bierną i pozorną odbiornika, jeżeli wartość skuteczna napięcia na odbiorniku wynosi $U = 230$ V i kąt fazowy $\varphi = 0$, prąd pobierany przez odbiornik $i(t) = 28,2 \sin (\omega t - \pi/2)$ A, pulsacja $\omega = 314$ rad/s.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- poradnik dla ucznia,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotycząca obwodów prądu przemiennego jednofazowego.

4.3.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) zdefiniować i wyjaśnić przebiegi prądu sinusoidalnego?	☐	☐
2) scharakteryzować parametry prądu sinusoidalnego?	☐	☐
3) zdefiniować wartość skuteczną prądu sinusoidalnego?	☐	☐
4) narysować wykres wektorowy przebiegu sinusoidalnego?	☐	☐
5) zdefiniować trzy rodzaje mocy prądu sinusoidalnego?	☐	☐
6) narysować wykres czasowy i wektorowy sumy napięć?	☐	☐

4.4. Elementy pasywne R, L, C w obwodzie prądu sinusoidalnego

4.4.1. Materiał nauczania

Dwójnik o rezystancji R w obwodzie prądu sinusoidalnego

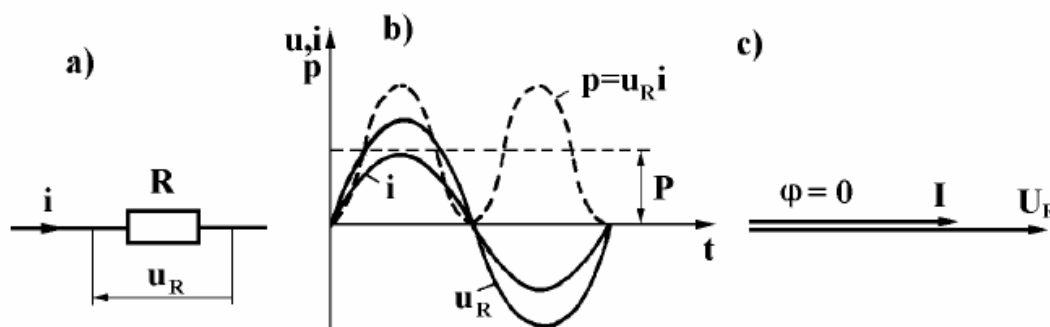
Jeżeli przez rezystancję R przepływa prąd sinusoidalny (rys. 24a)

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

to wywołuje na niej zgodnie z prawem Ohma napięcie u_R

$$u_R = i \cdot R = I_m R \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t,$$

które też jest sinusoidalne o pulsacji ω tak jak prąd. Jak widać napięcie na rezystancji R jest w fazie z prądem (rys. 24b,c), czyli przesunięcie fazowe między prądem i napięciem $\varphi = 0$.



Rys. 24. Analiza obwodu z rezystancją: a) obwód prądu sinusoidalnego z odbiornikiem w postaci opornika R, b) przebiegi czasowe napięcia, prądu i mocy chwilowej, c) wykres wektorowy napięcia i prądu dla tego obwodu [opracowanie własne]

Wartość skuteczna napięcia

$$U_R = \frac{U_{Rm}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{Rm} \cdot R}{\sqrt{2}} = I \cdot R$$

Moc czynna chwilowa tracona w rezystancji

$$p = u_R \cdot i = I_m \cdot U_{Rm} \cdot \sin^2 \omega t$$

a dla wartości skutecznych

$$P = U_R \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

Podsumowując stwierdzamy, że rezystor nie wprowadza przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem i pobiera tylko moc czynną. Energia elektryczna dostarczana do rezystora zamieniana jest na energię cieplną. Jednostką mocy czynnej jest wat [W].

Cewka indukcyjna idealna o indukcyjności L w obwodzie prądu sinusoidalnego

Jeśli do obwodu z cewką o indukcyjności L (o zerowej rezystancji) zostanie doprowadzone napięcie sinusoidalne $u = U_m \sin \omega t$, (rys. 25a) to pod wpływem przepływającego prądu i w cewce zaindukuje się siła elektromotoryczna (sem) e_s samoindukcji równa napięciu zasilania. Prąd jest opóźniony względem napięcia o kąt $\varphi = \pi/2$ (rys. 25c) i jego wartość chwilowa

$$i_L = \frac{U_m}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

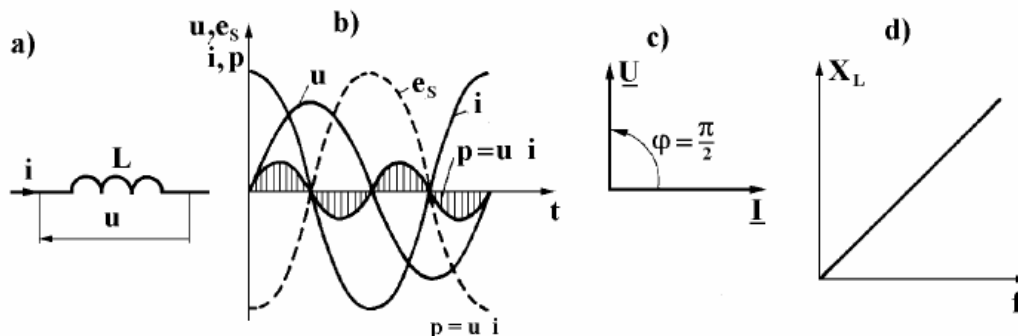
a wartość skuteczna:

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{X_L}$$

Wielkość ωL nazywa się reaktancją indukcyjną cewki i oznacza się ją X_L :

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

Jednostką reaktancji indukcyjnej jest om $[\Omega]$.



Rys. 25. Analiza obwodu z indukcyjnością: a) obwód prądu sinusoidalnego z odbiornikiem w postaci indukcyjności L , b) przebiegi czasowe napięcia, prądu i mocy chwilowej, c) wykres wektorowy napięcia i prądu dla tego obwodu, d) wykres reaktancji cewki w funkcji częstotliwości [opracowanie własne]

Odwrotność reaktancji indukcyjnej nazywamy susceptancją indukcyjną i oznaczamy ją literą B ,

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L}$$

Jednostką susceptancji jest siemens $[S]$.

Przebieg mocy chwilowej na idealnej cewce jest następujący:

$$p = u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \cos \omega t = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t$$

Moc czynna P jest równa zero

$$P = U I \cos \varphi = 0,$$

Moc bierna

$$Q = U I \sin \varphi = U I = S$$

Czasowy wykres zmian mocy w cewce pokazany jest na rys. 25b. Moc ta przyjmuje wartości dodatnie i ujemne oraz zmienia się w czasie z częstotliwością podwójną w stosunku do częstotliwości prądu i napięcia. Oznacza to, że idealna cewka w pewnym przedziale czasu pobiera energię elektryczną ze źródła, w innym zaś – oddaje tę energię do źródła. W przedziale czasu, w którym chwilowa wartość prądu wzrasta, energia jest zużywana na wytworzenie pola magnetycznego (cewka magazynuje energię). W przedziale czasu, w którym wartość prądu maleje, zmagazynowana w polu magnetycznym energia jest oddawana z cewki do źródła. Moc związana z przepływem prądu przez cewkę idealną nazywana jest mocą bierną indukcyjną i w odniesieniu do wartości skutecznych wyraża się zależnością:

$$Q_L = U_L \cdot I = X_L \cdot I^2 = \frac{U_L^2}{X_L}$$

Jednostką mocy biernej indukcyjnej jest war $[\text{var}]$.

Kondensator idealny o pojemności C w obwodzie prądu sinusoidalnego

Jeśli do obwodu z idealnym kondensatorem o pojemności C zostanie doprowadzone napięcie sinusoidalne $u = U_m \sin \omega t$ (rys. 26) to popłynie prąd wyprzedzający napięcie na kondensatorze kąt $\varphi = -\pi/2$, którego wartość chwilowa:

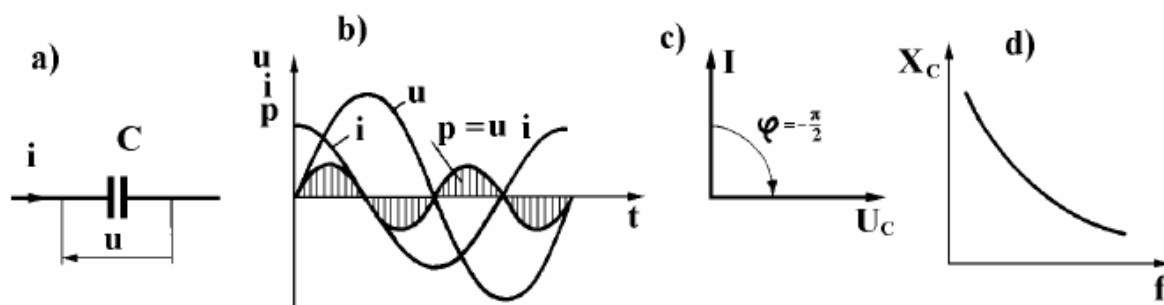
$$i_C = \omega C U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Wartość skuteczna prądu:

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{X_C}$$

gdzie: $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ reaktancja pojemnościowa kondensatora w omach. Odwrotność reaktancji pojemnościowej kondensatora nazywamy susceptancją pojemnościową:

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C$$



Rys. 26. Analiza obwodu z kondensatorem: a) Obwód prądu przemiennego z odbiornikiem w postaci idealnego kondensatora C, b) przebiegi napięć, prądu i mocy w układzie, c) wykres wektorowy prądu i napięcia; d) wykres reaktancji X_C kondensatora w funkcji częstotliwości [opracowanie własne]

Wartość chwilowa mocy na kondensatorze jest iloczynem wartości chwilowej prądu i napięcia:

$$p = u_C \cdot i = U_{Cm} \sin \omega t \cdot I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_{Cm} \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \cos \omega t = U_C \cdot I \cdot \sin 2\omega t$$

gdzie: U_C , I to wartości skuteczne napięcia i prądu.

Przebieg zmian wartości chwilowej mocy również pokazany jest na rys. 26b. Moc pobierana przez kondensator zmienia swoją wartość z podwójną częstotliwością w stosunku do częstotliwości zmian prądu i napięcia (rys. 26b), podobnie jak moc pobierana przez idealną cewkę. Energia elektryczna oscyluje między źródłem energii a rozpatrywanym kondensatorem. Kondensator pobiera energię z obwodu, gdy napięcie wzrasta, a oddaje ją do obwodu, gdy napięcie maleje. Oddawanie i pobieranie energii przez kondensator jest jednak przesunięte w czasie w stosunku do przedziałów czasu, w których energię pobiera i oddaje cewka. W przedziale czasu, w którym kondensator pobiera energię z obwodu, cewka ją oddaje do obwodu i na odwrót. W obwodach z kondensatorami energia pobierana przez kondensatory magazynowana jest w polu elektrycznym. Wartość chwilowa energii zmagazynowanej przez kondensator wyraża się:

$$W_C = \frac{C \cdot u^2}{2}$$

Moc związana z przepływem prądu przez kondensator jest mocą bierną pojemnościową i w odniesieniu do wartości skutecznych wyraża się równaniem:

$$Q_C = U_C \cdot I = X_C \cdot I^2 = \frac{U_C^2}{X_C}$$

lub

$$Q = U I \sin \varphi$$

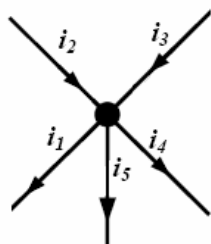
Jednostką mocy biernej pojemnościowej jest var [var].

Moc czynna

$$P = U I \cos \varphi = 0$$

Prawa Kirchhoffa w obwodach prądu przemiennego

I Prawo Kirchhoffa



Suma algebraiczna wartości chwilowych prądów w dowolnym węźle obwodu elektrycznego jest równa zero:

$i_2 + i_3 - i_4 - i_5 - i_1 = 0$ (rys. 26.). Dla dowolnej liczby prądów

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

Rys. 27. Dowolny węzeł obwodu [opracowanie własne]

Równoległe połączenie elementów R, L, C

Gdy do obwodu z równolegle połączonymi elementami R, L, C (rys. 28a) doprowadzimy napięcie $u = U_m \sin \omega t$, zgodnie z I prawem Kirchhoffa dla wartości chwilowych prądu mamy:

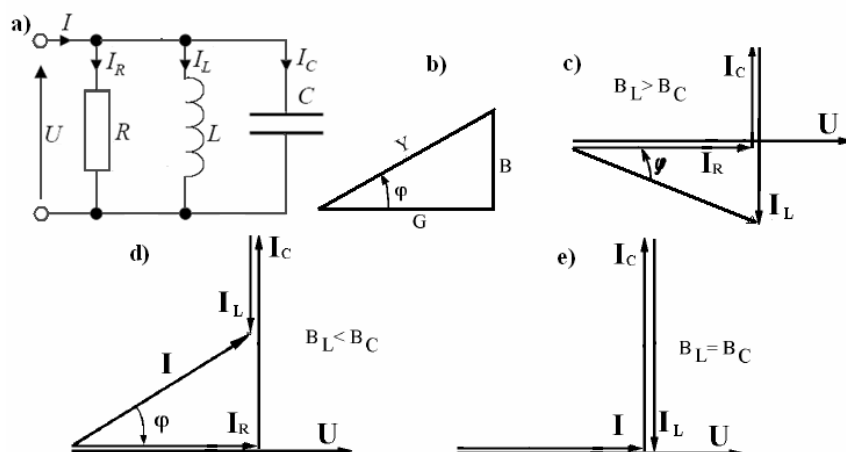
$$i = i_R + i_L + i_C$$

$$i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t + \frac{U_m}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + \omega C U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Admitancja obwodu równoległego obwodu RLC wynosi:

$$Y = \sqrt{G + (B_C - B_L)^2} = \sqrt{G^2 + B^2}$$

gdzie: $Y = 1/R$ – konduktancja w simensach; $B = B_L - B_C = (1/X_C) - (1/X_L)$ – susceptancja obwodu równoległego RLC. Jednostką admitancji jest simens [S].



Rys. 28. Obwód równoległy RLC: a) schemat; b) trójkąt składowych admitancji, c), d), e) wykresy wektorowe admitancji [opracowanie własne]

Z trójkąta admitancji mamy (rys. 28.b):

$$G = Y \cos \varphi \quad B = Y \sin \varphi \quad \operatorname{tg} \varphi = B/G$$

Dla wartości skutecznych napięcia i prądu mamy wzory:

$$I = Y \cdot U,$$

$$I_R = G \cdot U \text{ – prąd czynny,}$$

$$I_L = B_L \cdot U \text{ – prąd bierny indukcyjny,}$$

$$I_C = B_C \cdot U \text{ – prąd bierny pojemnościowy.}$$

Na rysunku 28 c,d,e przedstawiono wykresy wektorowe napięcia i prądów. Jeżeli $B_L > B_C$ (rys. 27c), to obwód ma charakter indukcyjny, jeżeli $B_L < B_C$ (rys. 28d), to obwód ma charakter pojemnościowy; jeżeli $B_L = B_C$ (rys. 27.e), to obwód ma charakter rezystancyjny. Stan, w którym $B_L = B_C$ a co za tym idzie, że $I_L = I_C$ nazywamy rezonansem prądów (rezonansem równoległym). Natężenia prądów I_L i I_C mogą znacznie przekroczyć wartość natężenia prądu wypadkowego I .

Częstotliwość przy której zachodzi rezonans prądów można obliczyć ze wzoru:

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

II Prawo Kirchhoffa

Suma algebraiczna wartości chwilowych napięć na wszystkich elementach R , L , C i sił elektromotorycznych w zamkniętym oczku obwodu jest równa zero

$$\sum_{k=1}^n e_k + \sum_{l=1}^m u_k = 0$$

Szeregowe połączenie elementów R , L , C

Gdy do obwodu z szeregowo połączonymi elementami R , L , C (rys. 29a) doprowadzimy napięcie $u = U_m \sin \omega t$, zgodnie z II prawem Kirchhoffa dla wartości chwilowych napięć mamy:

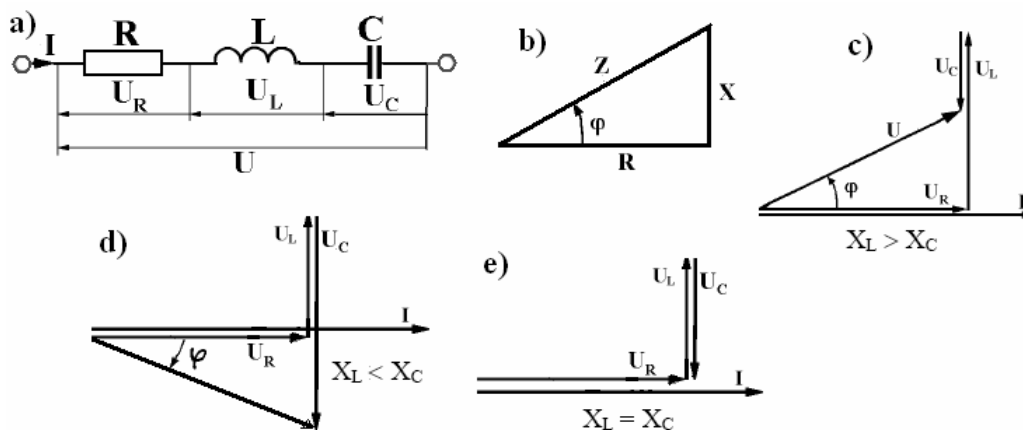
$$u = u_R + u_L + u_C$$

$$u = RI_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + \omega L I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

W szeregowym obwodzie R , L , C wprowadzamy pojęcie impedancji Z :

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

gdzie: $X = X_L - X_C$ – reaktancja obwodu szeregowego RLC. Jednostką impedancji jest Ω .



Rys. 29. Obwód szeregowy RLC: a) schemat; b) trójkąt składowych impedancji, c), d), e) wykresy wektorowe impedancji [opracowanie własne]

Z trójkąta impedancji mamy (rys. 29.b):

$$R = Z \cos \varphi \quad X = Z \sin \varphi \quad \operatorname{tg} \varphi = X/R$$

Dla wartości skutecznych napięcia i prądu mamy wzory:

$$U = Z I,$$

$$U_R = R I \quad \text{– napięcie czynne,}$$

$$U_L = X_L I = \omega L I \quad \text{– napięcie bierne indukcyjne,}$$

$$U_C = X_C I = I / \omega C \quad \text{– napięcie bierne pojemnościowe.}$$

Na rysunku 29 c,d,e przedstawiono wykresy wektorowe napięcia i prądów. Jeżeli $X_L > X_C$ (rys. 28c), obwód ma charakter indukcyjny; jeżeli $X_L < X_C$ (rys. 29d), obwód ma charakter pojemnościowy; jeżeli $X_L = X_C$ (rys. 29e), obwód ma charakter rezystancyjny. Stan, w którym $X_L = X_C$ a co za tym idzie, że $U_L = U_C$ nazywamy rezonans napięć (rezonans szeregowym). Wartości napięć U_L i U_C mogą znacznie przekroczyć wartość napięcia U .

Częstotliwość, przy której zachodzi rezonans napięć można obliczyć ze wzoru:

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

4.4.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jak zachowuje się rezystor w obwodzie prądu sinusoidalnego?
2. Jak zachowuje się cewka indukcyjna w obwodzie prądu sinusoidalnego, jakie są przebiegi czasowe a jaki jest wykres wektorowy prądu i napięcia?
3. Jak zachowuje się kondensator w obwodzie prądu sinusoidalnego, jakie są przebiegi czasowe, a jaki jest wykres wektorowy prądu i napięcia?
4. Jakimi wzorami opisuje się reaktancję cewki i kondensatora?
5. Jakimi wzorami opisuje się impedancję obwodu szeregowego RLC ?
6. Jakimi wzorami opisuje się susceptancję cewki i kondensatora?
7. Jakimi wzorami opisuje się admitancję obwodu równoległego RLC ?
8. Jakie rodzaje mocy wydzielają się na elementach R, L, C ?
9. Jaki jest warunek wystąpienia rezonansu napięć?
10. Jaki jest warunek wystąpienia rezonansu prądów?
11. Jaki jest warunek wystąpienia rezonansu prądów?
12. Jak oznacza się a jak oblicza częstotliwość rezonansową w obwodach RLC ?
13. Jak brzmi I i II prawo Kirchhoffa dla obwodów prądu przemiennego?
14. Na czym polega pojemnościowy i indukcyjny charakter obwodu?

4.4.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz wartość skuteczną prądu, napisz wzór na jego wartość chwilową, jeżeli do obwodu o rezystancji $R = 200 \Omega$ doprowadzono napięcie $u = 314 \sin \omega t$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obliczeń w obwodach prądu przemiennego.

Ćwiczenie 2

Oblicz wartość reaktancji indukcyjnej oraz susceptancji indukcyjnej cewki o indukcyjności $L = 12 \text{ mH}$, jeżeli częstotliwość: a) $f = 1000 \text{ Hz}$, b) $f = 20 \text{ kHz}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obliczeń w obwodach prądu przemiennego.

Ćwiczenie 3

Oblicz wartość reaktancji oraz susceptancji pojemnościowej kondensatora o pojemności $C = 10 \mu F$, jeżeli częstotliwość napięcia zasilającego $f = 50 \text{ Hz}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obliczeń w obwodach prądu przemiennego.

Ćwiczenie 4

Oblicz wartość impedancji Z szeregowego obwodu RL , w którym rezystancja $R = 120 \Omega$, indukcyjność $L = 0,5 \text{ H}$, częstotliwość $f = 50 \text{ Hz}$. Narysuj trójkąt impedancji.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obliczeń w obwodach prądu przemiennego.

Ćwiczenie 5

Oblicz wartość impedancji Z szeregowego obwodu RC , jeżeli rezystancja $R = 400 \text{ k}\Omega$, pojemność $C = 10 \text{ nF}$, częstotliwość $f = 50 \text{ Hz}$. Narysuj trójkąt impedancji i wyznacz kąt φ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,

- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obliczeń w obwodach prądu przemiennego.

Ćwiczenie 6

Oblicz wartości indukcyjności L i pojemności C kondensatora w szeregowym obwodzie RLC w którym, $U_R = 40 \text{ V}$, $U_L = 40 \text{ V}$, $U = 50 \text{ V}$, $R = 160 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą obliczeń w obwodach prądu przemiennego.

4.4.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) narysować wykresy czasowe i wektorowe prądu i napięcia rezystora?	☐	☐
2) wyjaśnić, co to jest reaktancja cewki?	☐	☐
3) wyjaśnić, co to jest reaktancja kondensatora?	☐	☐
4) narysować wykresy czasowe wektorowe prądu i napięcia cewki?	☐	☐
5) narysować wykresy czasowe i wektorowe prądu i napięcia kondensatora?	☐	☐
6) zapisać prawo Ohma dla obwodu szeregowego RLC?	☐	☐
7) wyjaśnić, co to jest impedancja obwodu szeregowego RLC?	☐	☐
8) zapisać I i II prawo Kirchhoffa dla obwodów RLC?	☐	☐
9) zapisać prawo Ohma dla obwodu równoległego RLC?	☐	☐
10) wyjaśnić, co to jest admitancja obwodu równoległego RLC?	☐	☐
11) wyjaśnić, co to jest rezonans napięć i prądów?	☐	☐
12) obliczyć, częstotliwość rezonansową w obwodach RLC?	☐	☐
13) wyjaśnić, kiedy obwód RLC posiada charakter rezystancyjny?	☐	☐
14) wyjaśnić, kiedy obwód RLC posiada charakter pojemnościowy?	☐	☐
15) wyjaśnić, kiedy obwód RLC posiada charakter indukcyjny?	☐	☐

4.5. Układy trójfazowe prądu sinusoidalnie zmiennego

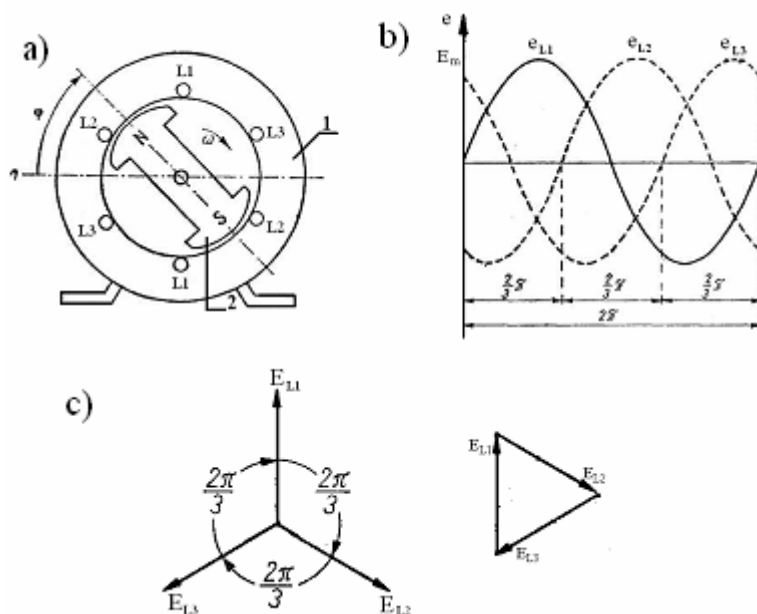
4.5.1. Materiał nauczania

Wytwarzanie prądu trójfazowego

Prądem trójfazowym nazywa się układ trzech jednofazowych prądów sinusoidalnych o tej samej amplitudzie i częstotliwości, przesuniętych względem siebie o $1/3$ okresu. Poszczególne obwody układu trójfazowego nazywamy fazami i oznaczamy L1, L2, L3 (dawniej stosowano oznaczenia R, S, T).

Prąd trójfazowy wytwarza się, podobnie jak prąd przemienny sinusoidalny jednofazowy, w prądnicach synchronicznych. Prądnica prądu trójfazowego różni się od prądnicy jednofazowej jedynie tym, że na wewnętrznej powierzchni jej stojana mieszczą się trzy uzwojenia, należące do poszczególnych faz oznaczonych literami L1, L2, L3, przesunięte względem siebie o kąt 120° (rys. 30). Przy wirowaniu magnesu (wirnika) indukują się w trzech uzwojeniach fazowych stojana siły elektromotoryczne wyrażone wzorami:

$$e_{L1} = E_m \sin \omega t$$



Rys. 30. Zasada wytwarzania prądu trójfazowego: a) przebiegi czasowe, b) wykresy wektorowe sił elektromotorycznych, 1 – stojan, 2 – wirnik, φ – faza początkowa (zwykle $\varphi = 0$) [opracowanie własne]

Wirujący strumień magnetyczny przecina kolejno uzwojenia fazy L1, L2, L3, wobec czego napięcie e_{L2} opóźnia się względem napięcia e_{L1} o $1/3$ okresu, a napięcie e_{L3} opóźnia się względem napięcia e_{L1} o $2/3$ okresu. Przy jednakowych liczbach zwojów uzwojeń wszystkich trzech faz amplituda E_m sił elektromotorycznych jest jednakowa; mówimy wówczas o symetrycznym układzie napięć źródła trójfazowego, a źródło nazywamy symetrycznym. Przebiegi czasowe napięć pokazane są na rys. 30b. W symetrycznym układzie trójfazowym suma wartości chwilowych sił elektromotorycznych równa się zero:

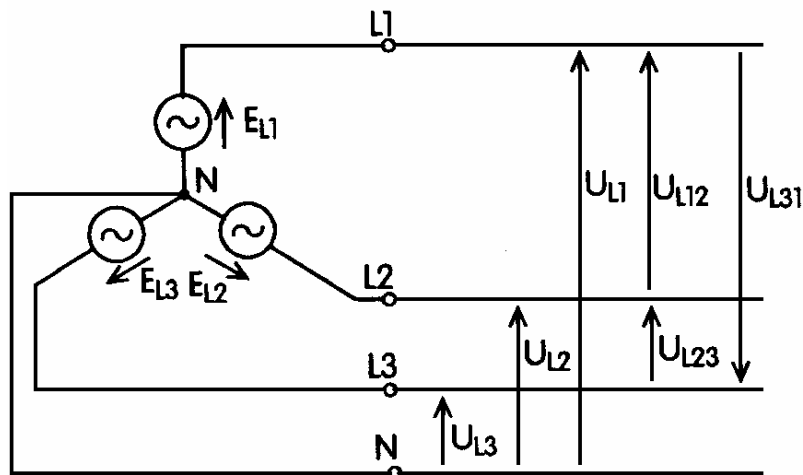
$$e_{L1} + e_{L2} + e_{L3} = 0$$

co oznacza, że geometryczna suma wektorów napięć jest także równa zero.

Łączenie źródeł w gwiazdę i w trójkąt

Układy trójfazowe, po galwanicznym połączeniu faz tworzą tak zwany układ skojarzony. Układy trójfazowe można kojarzyć na dwa sposoby: w gwiazdę lub w trójkąt. Gdy połączymy

końce faz a początki zostaną wyprowadzone na linię, otrzymamy połączenie źródeł w gwiazdę. Przewody wyprowadzone na linię nazywamy fazami a wspólny punkt, łączący końce faz nazywamy punktem neutralnym i oznaczamy go literą N. Układy trójfazowe połączone w gwiazdę tworzyć układ trójprzewodowy lub jeśli wyprowadzimy z punktu neutralnego czwarty przewód, otrzymamy czteroprzewodowy układ źródła prądu trójfazowego połączonego w gwiazdę (rys. 31).



Rys. 31. Trójfazowy układ skojarzony źródła napięcia połączony w gwiazdę czteroprzewodowy [opracowanie własne]

W układzie tym wyróżniamy dwa rodzaje napięć:

- napięcia fazowe, występujące między przewodem fazowym a neutralnym: U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} ,
- napięcia międzyfazowe (międzyprzewodowe), występujące między przewodami fazowymi: U_{L12} , U_{L23} , U_{L32} (rys. 30).

Napięcia międzyfazowe obliczymy następująco:

$$u_{L12} = u_{L1} - u_{L2}$$

$$u_{L23} = u_{L2} - u_{L3}$$

$$u_{L31} = u_{L3} - u_{L1}$$

Dodając stronami powyższe równania otrzymamy:

$$u_{L12} + u_{L23} + u_{L31} = 0$$

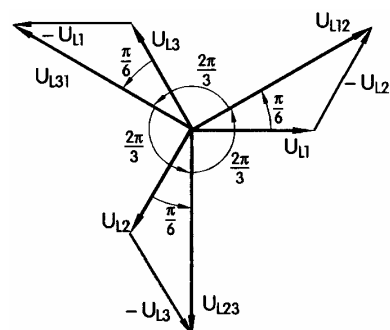
czyli tak samo jak dla napięć źródłowych. Jeżeli przejdziemy do wartości skutecznych, różnicę algebraiczną zastępujemy różnicą geometryczną odpowiednich wektorów wartości skutecznych. Odejmowanie wektorów można zastąpić dodawaniem wektora o przeciwnym zwrocie co pokazano na rys. 32.

Między napięciami fazowymi, które będziemy oznaczali przez U_f , a napięciami międzyfazowymi, które będziemy oznaczali przez U w układzie symetrycznym trójfazowym zachodzi związek:

$$U = \sqrt{3}U_f$$

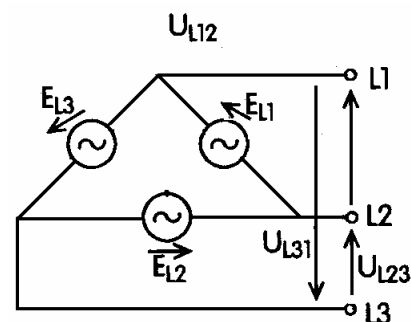
Powszechnie stosowanym układem w sieciach niskiego napięcia, nn, jest układ gwiazdowy czteroprzewodowy (rys. 30). Napięcie jednofazowe stosowane w Polsce wynosi

$U_f = 230 \text{ V}$. Napięcie międzyfazowe $U = \sqrt{3}U_f = \sqrt{3} \cdot 230 = 400 \text{ V}$. Sieć czteroprzewodowa niskiego napięcia, stosowana do celów ochrony przeciwporażeniowej ma uziemiony punkt neutralny N.



Rys. 32. Wykres wektorowy napięć fazowych i międzyfazowych źródła połączzonego w gwiazdę [opracowanie własne]

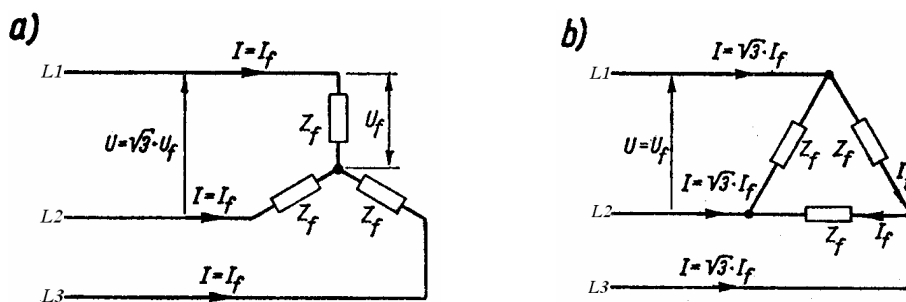
Układ połączenia źródła w trójkąt (rys. 33) otrzymuje się łącząc zacisk końcowy jednej fazy z zaciskiem początkowym następnej fazy i ten wspólny zacisk wyprowadzamy na linię. Powstaje oczko w którym zgodnie z II prawem Kirchhoffa suma chwilowych wartości napięć międzyfazowych jest równa zero. W związku z tym, jeżeli źródło nie jest obciążone odbiornikiem nie płynie prąd. W układzie tym napięcie fazowe jest równe przewodowemu $U_f = U$, a sieć zasilająca może być tylko trójprzewodowa.



Rys. 33. Źródło napięcia połączone w trójkąt [opracowanie własne]

Łączenie odbiorników w gwiazdę i trójkąt

W układach trójfazowych stosuje się połączenia odbiorników w gwiazdę lub w trójkąt. Niezależnie od sposobu połączenia odbiornika może on być symetryczny, jeżeli impedancje wszystkich faz są takie same $Z_A = Z_B = Z_C = Z_f = Z$. W przeciwnym razie odbiornik nazywamy niesymetrycznym. Rysunek 34 przedstawia o trójfazowy odbiornik symetryczny połączony: a) w gwiazdę, b) w trójkąt.



Rys. 34. Trójfazowy odbiornik symetryczny połączony w: a) połączony w gwiazdę, b) połączony w trójkąt [opracowanie własne]

Odbiornik symetryczny połączony w gwiazdę

Prądy płynące w poszczególnych fazach są jednocześnie prądami odbiorników: $I = I_f$.

Wartości skuteczne tych prądów są sobie równe. Napięcia międzyfazowe są równe: $U = \sqrt{3}U_f$ czyli napięcia faz odbiornika są $\sqrt{3}$ razy mniejsze niż przewodowe. Prąd można obliczyć ze wzoru:

$$I = I_f = \frac{U_f}{Z_f}$$

Odbiornik symetryczny połączony w trójkąt

Napięcia międzyfazowe są jednocześnie napięciami fazowymi $U = U_f$. Prądy przewodowe są razy większe niż prądy fazowe: $I = \sqrt{3} I_f$. Prąd odbiornika w każdej fazie można obliczyć ze wzoru:

$$I_f = \frac{U}{Z_f}$$

Moc w układach trójfazowych

W układach trójfazowych podobnie jak jednofazowych mamy do czynienia z mocą czynną P , mocą bierną Q i z mocą pozorną S . W każdej fazie moce określone są następująco:

- moc czynna $P_f = U_f I_f \cos \varphi$,
- moc bierna $Q_f = U_f I_f \sin \varphi$,
- moc pozorna $S_f = U_f I_f$.

Moc całkowita układu trójfazowego (dowolnego) jest równa:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos\varphi_A + U_B I_B \cos\varphi_B + U_C I_C \cos\varphi_C$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin\varphi_A + U_B I_B \sin\varphi_B + U_C I_C \sin\varphi_C$$

$$S = S_A + S_B + S_C = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$$

gdzie przez A, B, C oznaczono poszczególne fazy. W przypadku symetrycznego obciążenia wzory przyjmą postać:

$$P = 3 P_f = 3 U_f I_f \cos\varphi,$$

$$Q = 3 Q_f = 3 U_f I_f \sin\varphi,$$

$$S = 3 S_f = 3 U_f I_f.$$

Uwzględniając zależności między wielkościami fazowymi i międzyfazowymi, dla gwiazdy: $I = I_f$ i $U = \sqrt{3} U_f$, dla trójkąta: $I = \sqrt{3} I_f$ i $U = U_f$ niezależnie od sposobu połączenia odbiornika słuszne są wzory:

$$P = \sqrt{3} U I \cos\varphi$$

$$Q = \sqrt{3} U I \sin\varphi$$

$$S = \sqrt{3} U I$$

Znak mocy biernej zależy od charakteru impedancji odbiornika. Pomiary mocy czynnej w obwodach prądu przemiennego wykonuje się za pomocą watomierzy. Do pomiarów mocy biernej można stosować waromierze. Moc pozorną można określać z pomiaru prądu i napięcia na odbiorniku lub na podstawie wartości mocy czynnej i biernej oraz trójkąta mocy.

4.5.2. Pytania sprawdzające

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

1. Co to jest napięcie trójfazowe?
2. Co to jest układ skojarzony?
3. Jak można łączyć źródła i odbiorniki 3-fazowe?
4. Co nazywamy fazą układu trójfazowego?
5. Jakimi równaniami opisujemy napięcie trójfazowe?
6. Jak wygląda przebieg czasowy i wykres wektorowy napięcia trójfazowego?
7. Jak określamy napięcia fazowe i międzyfazowe?
8. Jaka jest zależność między napięciem fazowym a międzyfazowym?
9. Jak zbudowany jest odbiornik 3-fazowy połączony w gwiazdę, a jak połączony w trójkąt?
10. Jaki odbiornik i źródło 3-fazowe nazywamy symetrycznymi?
11. Jak oblicza się wartość mocy pobranej przez odbiornik 3-fazowy symetryczny?

4.5.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Trzy grzałki o mocy $P_1 = P_2 = P_3 = 100 \text{ W}$ połączono w gwiazdę i podłączono do sieci trójfazowej czteroprzewodowej o napięciu międzyfazowym $U_f = 230 \text{ V}$. Dokonaj obliczeń wielkości elektrycznych dla tego układu.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować schemat obwodu, zaznaczyć zwroty prądów i napięć w obwodzie,
- 2) obliczyć wartości prądów fazowych odbiornika i przewodowych linii zasilających,

- 3) obliczyć moc czynną, bierną i pozorną pobieraną przez odbiornik,
- 4) narysować wykresy wektorowe prądów i napięć.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier formatu A4, przyrządy do pisania,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą układów trójfazowych.

Ćwiczenie 2

Trzy grzejniki o rezystancji $R = 11 \, \Omega$ połączono w trójkąt i podłączono do sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym $U_f = 230 \, V$. Dokonaj obliczeń wielkości elektrycznych dla tego układu.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinien:

- 1) narysować schemat obwodu, zaznaczyć zwroty prądów i napięć w obwodzie,
- 2) obliczyć wartości prądów fazowych odbiornika i przewodowych linii zasilających,
- 3) obliczyć moc czynną, bierną i pozorną pobieraną przez odbiornik,
- 4) narysować wykresy wektorowe prądów i napięć.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier formatu A4, przyrządy do pisania,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą układów trójfazowych.

Ćwiczenie 3

Trzy rezystory o rezystancji R połączono raz gwiazdę a raz w trójkąt a następnie włączono do źródła trójfazowego symetrycznego. Dokonaj analizy pracy dla obydwu odbiorników pod kątem poboru mocy z linii zasilającej. Wyciągnij wnioski z otrzymanych wyników.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinien:

- 1) narysować schemat obwodu, zaznaczyć zwroty prądów i napięć w obwodzie,
- 2) obliczyć wartości prądów fazowych odbiornika i przewodowych linii zasilających,
- 3) obliczyć moc czynną, bierną i pozorną pobieraną przez odbiornik,
- 4) narysować wykresy wektorowe prądów i napięć.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier formatu A4, przyrządy do pisania,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą układów trójfazowych.

4.5.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) zdefiniować pojęcia układu trójfazowego i źródła trójfazowego?	☐	☐
2) narysować przebiegi czasowe i wykres wektorowy napięcia trójfazowego?	☐	☐
3) narysować układy pracy źródeł 3-fazowych?	☐	☐
4) narysować układy pracy odbiorników 3-fazowych?	☐	☐
5) zdefiniować pojęcia odbiornika symetrycznego i niesymetrycznego w układzie gwiazdy i trójkąta?	☐	☐
6) zdefiniować napięcia fazowe i międzyfazowe źródła pracującego?	☐	☐
7) określić wartości napięć fazowych i międzyfazowych w sieci trójfazowej?	☐	☐
8) zmierzyć wartości napięć źródła 3-fazowego?	☐	☐
9) określić wartość mocy czynnej pobieranej przez odbiornik 3-fazowy?	☐	☐
10) przekształcić odbiornik połączony w gwiazdę na trójkąt?	☐	☐

4.6. Urządzenia grzejne

4.6.1. Materiał nauczania

W grzejnictwie elektrycznym wykorzystuje się zjawiska zamiany energii elektrycznej na energię cieplną. Do zjawisk tych należą:

- wydzielanie się ciepła podczas przepływu prądu elektrycznego przez przewód elektryczny. Na tej zasadzie jest oparta konstrukcja grzejników gospodarstwa domowego, piecyków ogrzewczych, spawarek stykowych, niektórych pieców przemysłowych i suszarek,
- wydzielanie się ciepła podczas przepływu prądu przez elektrolit,
- wydzielanie się ciepła w łuku elektrycznym, powstającym między elektrodami w obwodzie elektrycznym. Na tej zasadzie pracują piece w przemyśle hutniczym, chemicznym oraz spawarki elektryczne,
- wydzielanie się ciepła wskutek powstawania prądów indukcyjnych w przewodniku znajdującym się w zmiennym polu magnetycznym,
- wydzielanie się ciepła w dielektryku znajdującym się w zmiennym polu elektrycznym. Zjawisko to wykorzystuje się przy nagrzewaniu tłoczyw, suszeniu i klejeniu drewna, nagrzewaniu żywności, sterylizacji zboża i mąki, pasteryzacji mleka i piwa, spawaniu powłok igelitowych oraz w lecznictwie (diatermia),
- zamiana energii promienistej podczerwieni na cieplną w ciałach pochłaniających te promienie. Zamiana energii elektrycznej na promieniowania odbywa się w rozżarzonym żarniku promiennika.

Ilość ciepła Q , potrzebnego do ogrzania jakiegoś ciała od temperatury t_1 do temperatury t_2 wynosi:

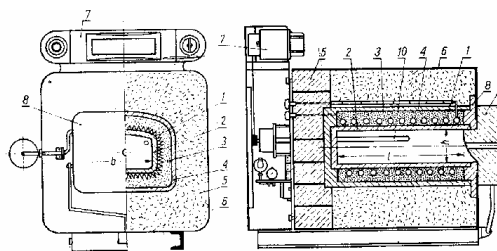
$$Q = m c (t_2 - t_1)$$

gdzie: m – masa ciała; c – ciepło właściwe ciała.

Ze względu na zasadę działania rozróżnia się następujące rodzaje urządzeń grzejnych: urządzenia oporowe, urządzenia elektrodowe, łukowe, indukcyjne, pojemnościowe, promiennikowe

Nagrzewanie oporowe

Nagrzewanie oporowe polega na wykorzystywaniu ciepła wydzielanego podczas przepływu prądu przez specjalne elementy grzejne lub materiał nagrzewany. Pierwszy sposób nosi nazwę nagrzewania oporowego pośredniego, drugi – bezpośredniego. Podstawowymi typami przemysłowych urządzeń do oporowego nagrzewania pośredniego są piece oporowe, suszarki i cieplarki. Różnią się one od siebie przede wszystkim zakresem osiąganych temperatur. Temperatura w piecach oporowych osiąga zależnie od typu pieca do 2000°C. Zakres roboczy temperatur suszarek nie przekracza 300°C. Cieplarki służą do utrzymywania podwyższonej temperatury w zakresie kilkudziesięciu stopni Celsjusza, potrzebnej do uzyskania pożądanego przebiegu procesów biologicznych.



Rys. 35. Piec oporowy: 1 – elementy grzejne, 2 – szamotowe ścianki komory, 3, 4, 5, 8 – izolacja termiczna, 6 – obudowa stalowa, 7 – regulator temperatury, 9 – drzwi, 10 – czujnik temperatury
[opracowanie własne]

Piec oporowy (rys. 35) ma postać komory z materiałów ogniotrwałych i termoizolacyjnych o kształcie zależnym od typu i przeznaczenia. Na ściankach lub w ściankach komory są umieszczone elementy grzejne w postaci drutów lub taśm metalowych, prętów karborundowych, prętów grafitowych itp. W piecach oporowych wsad lub kąpiel są ogrzewane przez promieniowanie ciepłe ścian pieca lub bezpośrednio przez promieniowanie elementów grzejnych. Najczęściej stosuje się je do obróbki cieplnej wsadu, do topienia zaś o wiele rzadziej. Ze względu na zakres osiąganych temperatur piece oporowe dzieli się na niskotemperaturowe, do 500°C, średniotemperaturowe 500÷1250°C i wysokotemperaturowe, powyżej 1250°C. Różnią się one konstrukcją i rodzajem stosowanych elementów grzejnych oraz materiałów ogniotrwałych i termoizolacyjnych.

Nagrzewanie elektrodowe

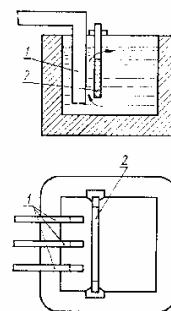
Nagrzewanie elektrodowe polega na wyzyskaniu ciepła wydzielającego się przy przepływie prądu elektrycznego przez elektrolity. Jeśli wsadem ogrzewanym jest sam elektrolit, to nagrzewanie nazywamy bezpośrednim. Jeśli celem jest nagrzanie elementów stałych przez zanurzenie w gorącym elektrolicie, to mamy do czynienia z nagrzewaniem elektrodowym pośrednim. Urządzenia do nagrzewania elektrodowego podzielić można na dwie grupy:

- 1) urządzenia, w których zjawiska elektrolityczne są niepożądane. Do grupy tej należą kotły elektrodowe do bezpośredniego nagrzewania wody oraz piece elektrodowe do pośredniego nagrzewania materiałów stałych. Urządzenia należące do tej grupy zasilają się wyłącznie prądem zmiennym,
- 2) urządzenia zwane termoelektrolizerami, w których oprócz procesów elektrotermicznych wykorzystuje się zjawiska elektrolizy. Urządzenia te zasilają się prądem stałym.

Kotły elektrodowe stosuje się do bezpośredniego nagrzewania wody lub wytwarzania pary. Mają one postać zbiornika napełnionego wodą, w której są zanurzone elektrody połączone ze źródłem napięcia. Każda elektroda jest otoczona koncentrycznie rurą z materiału nieprzewodzącego. Przesuwając rurę wzdłuż osi elektrody można regulować natężenie prądu pobieranego przez kocioł. Ogrzewanie wody energią elektryczną jest droższe od ogrzewania węglem i dlatego kotły elektrodowe stosuje się tam, gdzie jest wymagana duża dokładność regulacji lub gdzie gorąca woda lub para są potrzebne doraźnie i nie opłaca się instalowanie kotła opalanego paliwem chemicznym.

Piece elektrodowe (rys. 36) zwane też wannami solnymi mają postać zbiornika z roztopioną solą grzejącą, w której są zanurzone elektrody. Zależnie od wysokości uzyskiwanych w piecu temperatur stosuje się różne mieszaniny soli potasu, sodu i baru. Sole stają się dobrymi przewodnikami prądu dopiero po stopieniu. W zimnym piecu prąd płynący pod wpływem napięcia zasilającego jest zbyt mały do wytworzenia mocy potrzebnej do stopienia soli. Dlatego do wstępnego stopienia soli stosuje się elektrody-podgrzewacze umieszczone tak blisko siebie, aby można było uzyskać wystarczające natężenie prądu. Elektrody te po rozruchu pieca usuwa się. Piece elektrodowe o wysokich temperaturach roboczych stosuje się do powierzchniowego cementowania i hartowania przedmiotów stalowych, niskotemperaturowe – do odpuszczania.

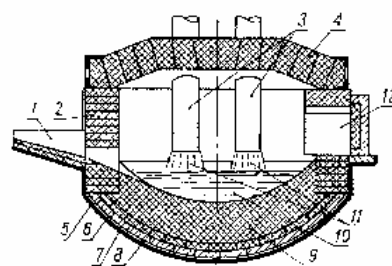
Nagrzewanie łukowe polega na wyzyskaniu ciepła wydzielającego się w łuku elektrycznym podczas przepływu prądu elektrycznego w powietrzu. Nagrzewanie łukowe charakteryzuje się bardzo nierównomiernym nagrzewaniem wsadu i wskutek tego nadaje się



Rys. 36. Piec elektrodowy
1 – elektrody robocze,
2 – przegroda
[opracowanie własne]

do takich procesów, w których nierównomierność temperatury nie ma znaczenia, np do wytapiania metali, gdzie wyrównanie temperatur następuje drogą konwekcji. Wytapianie metali za pomocą nagrzewania łukowego odbywa się w piecach łukowych, które mogą być trójakiego rodzaju: o nagrzewaniu pośrednim, o nagrzewaniu bezpośrednim lub oporowo-łukowe.

Piece łukowe o nagrzewaniu pośrednim mają przeważnie postać leżącego bębna z elektrodami umieszczonymi wzdłuż jego osi. Elektrody są umocowane w sposób umożliwiający ich przesuwanie wzdłuż osi i regulowanie dzięki temu długości łuku. Ściany takiego pieca są ogrzewane promieniowaniem łuku w takim samym stopniu jak wsad, a ponieważ mają złą przewodność cieplną mogą nagrzać się do bardzo wysokiej temperatury. Aby tego uniknąć, piec podczas pracy obraca się ruchem wahadłowym, aby zapewnić chłodzenie ścian stopionym metalem. W piecu łukowym o nagrzewaniu bezpośrednim (rys. 37) elektrody są umieszczone pionowo, a łuk pali się między elektrodami a wsadem. W piecu takim większa część ciepła wydzielanego w łuku jest przekazywana bezpośrednio do wsadu, co umożliwia uzyskanie wyższej temperatury wsadu niż w piecach pośrednich. Piece takie stosuje się do topienia trudnotopliwych metali, przede wszystkim stali stopowych.



Rys. 37. Piec łukowy bezpośredni
1 – spust, 2, 4, 9 – wyprawa ogniotrwała,
3 – elektrody, 5 – obudowa stalowa,
10 – wsad [opracowanie własne]

Nagrzewanie indukcyjne polega na wykorzystaniu ciepła Joule’a wydzielającego się przy przepływie prądu przez materiał przewodzący. Materiałem przewodzącym mogą być ścianki tygla (sposób rzadko stosowany) lub sam wsad w postaci stałej lub ciekłej. Przepływ prądu uzyskuje się w tyglu lub wsadzie za pomocą zmiennego strumienia magnetycznego. Jeśli przez wsad przenika zmienny strumień magnetyczny, to indukują się w nim prądy wirowe, które nagrzewają go. Nagrzewanie indukcyjne stosuje się w piecach indukcyjnych do topienia metali i w nagrzewnicach indukcyjnych do nagrzewania przedmiotów metalowych.

Nagrzewanie pojemnościowe polega na wykorzystaniu ciepła strat dielektrycznych występujących w niedoskonałym dielektryku. Moc cieplna wydzielana w dielektryku

$$P = 2\pi f C U^2 \operatorname{tg} \delta$$

gdzie: U – napięcie zasilające, C – pojemność kondensatora, f – częstotliwość napięcia zasilającego, $\operatorname{tg} \delta$ – współczynnik strat dielektryka. Przedmiot nagrzewany umieszcza się między okładkami kondensatora zasilanymi napięciem zmiennym o wielkiej częstotliwości (rzędu megaherców, $1\text{MHz} = 10^6\text{Hz}$). Metodę pojemnościową stosuje się tylko do podgrzewania tworzyw sztucznych, suszenia i klejenia drewna, suszenia tytoniu, wulkanizacji kauczuku, pasteryzacji mleka, odmrażania owoców.

Nagrzewanie mikrofalowe – do nagrzewania dielektryka wykorzystuje się generatory, zwane magnetronami, wytwarzające fale elektromagnetyczne o częstotliwościach rzędu kilku do kilkunastu gigaherców (tzw. mikrofałe) ($1\text{GHz} = 10^9\text{Hz}$) i o mocy wyjściowej około 1000W. Fale te przenikając wsad powodują jego nagrzewanie.

Nagrzewanie promiennikowe

Nagrzewanie promiennikowe polega na wyzyskaniu energii promieniowania padającego na wsad. Promieniowanie padające na dowolny materiał ulega częściowo odbiciu, częściowo przepuszczeniu, a częściowo pochłonięciu. Energia pochłoniętej części promieniowania ulega przemianie na ciepło. Część promieniowania, która została przepuszczona przez zewnętrzną

warstwę materiału, może ulec całkowitemu pochłonięciu w następnych warstwach, jeśli grubość nagrzewanego materiału jest wystarczająca. Jeśli materiał ma duży współczynnik pochłaniania, to promieniowanie ulega pochłonięciu w cienkiej warstwie zewnętrznej i przede wszystkim ta warstwa zostaje ogrzana. Jeśli materiał ma większą przezroczystość, to nagrzana zostaje grubsza warstwa materiału. Współczynnik pochłaniania większości materiałów zależy od długości fal promieniowania, zatem głębokość nagrzewania można w pewnym stopniu zmieniać, zmieniając długość fali niosącej maksimum mocy promieniowania. Techniczne źródła promieniowania stosowanego do celów grzejnych noszą nazwę promienników. Szerokie zastosowanie znalazły dwa podstawowe typy promienników: lampowe i rurkowe. Sporadycznie stosuje się również promienniki ceramiczne i kwarcowe.

4.6.2. Pytania sprawdzające

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

1. Na czym polega grzejnictwo elektryczne?
2. Jakie rodzaje zjawisk wykorzystuje się w grzejnictwie elektrycznym?
3. Co to jest nagrzewanie oporowe i jakie znasz jego rodzaje?
4. Co to jest nagrzewanie elektrodowe i jakie znasz jego rodzaje?
5. Co to jest nagrzewanie indukcyjne i jakie znasz jego rodzaje?
6. Co to jest nagrzewanie pojemnościowe?
7. Co to jest nagrzewanie promiennikowe?

4.6.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz, ile kalorii energii cieplnej otrzymuje się z 1 kWh energii elektrycznej, wiedząc, że $1 \text{ J} = 0.239 \text{ cal}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą urządzeń grzejnych.

Ćwiczenie 2

Oblicz ilość energii cieplnej wydzielonej w grzejniku lutownicy elektrycznej w ciągu jednej godziny, jeżeli przez grzejnik o rezystancji $R = 1,1 \text{ k}\Omega$ przepływa prąd $I = 0,2 \text{ A}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą urządzeń grzejnych.

Ćwiczenie 3

Oblicz, ile wody o temperaturze 10°C można zagotować, zużywając 3 kWh energii elektrycznej? Sprawność $\eta = 1$. Ciepło właściwe wody $c_w = 4180 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)} = 1 \text{ kcal/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą urządzeń grzejnych.

4.6.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyjaśnić co to jest elektrotermia?	☐	☐
2) wymienić rodzaje zjawisk, jakie wykorzystuje się w grzejnictwie elektrycznym?	☐	☐
3) określić rodzaje nagrzewania oporowego ?	☐	☐
4) określić rodzaje nagrzewania indukcyjnego?	☐	☐
5) określić rodzaje nagrzewania łukowego?	☐	☐
6) określić rodzaje nagrzewania pojemnościowego?	☐	☐
7) określić rząd częstotliwości w nagrzewaniu mikrofalowym?	☐	☐
8) zastosować prawo Joule'a?	☐	☐
9) wyjaśnić wpływ sprawności urządzenia grzejnego na koszt energii zużywanej w procesie grzejnym?	☐	☐

4.7. Źródła światła

4.7.1. Materiał nauczania

Światło jest to promieniowanie elektromagnetyczne rozchodzące się z prędkością 300.000 km/s. Światło obejmuje pasmo o długościach od 380 nm do 780 nm nazywane też promieniowaniem widzialnym. Intensywność odbieranego przez oko wrażenia zależy od długości fali promieniowania widzialnego.

Podstawowe pojęcia techniki świetlnej

Strumień świetlny – jest to ilość energii świetlnej wypromieniowanej przez źródło światła w jednostce czasu:

$$\Phi = \frac{W}{t}$$

Jednostką strumienia świetlnego jest lumen [lm].

Światłość – jest to stosunek strumienia świetlnego, emitowanego przez źródło światła do kąta przestrzennego (ω) obejmującego ten strumień. Jeśli dla danego kąta przestrzennego strumień jest równomierny, światłość możemy wyrazić jako:

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

Jednostką światłości jest kandela [cd]; 1 cd 1 lm/srd (srd – steradian, jednostka kąta przestrzennego).

Natężenie oświetlenia – jest to stosunek strumienia świetlnego Φ padającego na powierzchnię S do wielkości tej powierzchni:

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Jednostką natężenia oświetlenia jest luks [lx]; 1 lx = 1 lm/m².

Luminancja (jaskrawość) – jest to światłość w danym kierunku przypadająca na jednostkę pozornej powierzchni źródła światła:

$$L = \frac{I_{\alpha}}{S \cos \alpha}$$

gdzie: światłość kierunkowa, α – kąt jaki tworzy promień świetlny z pionem.

Dla kierunku prostopadłego ($\alpha = 0$), można napisać:

$$L = \frac{I}{S}$$

Jednostką luminancji jest nit [nt]; 1 nt = 1 cd/m².

Skuteczność świetlna – jest to stosunek całkowitego strumienia świetlnego wysyłanego przez źródło światła do mocy pobranej przez to źródło

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

Jednostką skuteczności świetlnej jest lm/W.

Elektryczne źródła światła

Współczesne elektryczne źródła światła wykorzystują głównie zjawiska promieniowania pod wpływem temperatury (inkandescencji), luminescencji oraz fluorescencji.

Elektroluminescencyjne źródła światła, tzw. kondensatory świecące, nie znalazły dotąd szerszego zastosowania do celów oświetleniowych.

Temperaturowe wytwarzanie światła jest spowodowane termicznym wzbudzeniem atomów ciała promieniującego i charakteryzuje się jednoczesnym wysyłaniem przez ciało promieniujące fal elektromagnetycznych o różnych długościach.

Luminescencja jest spowodowana wzbudzeniem atomów kosztem energii chemicznej, elektrycznej, promienistej itd. Działanie elektrycznych źródeł światła może opierać się na zastosowaniu każdego z tych sposobów lub kilku równocześnie.

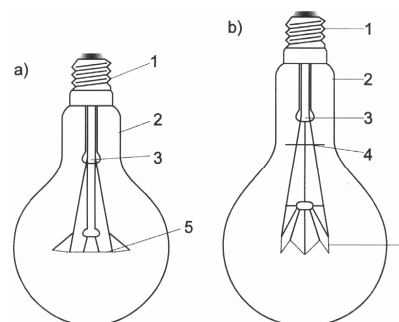
Do oceny elektrycznych źródeł światła służą następujące wielkości:

- a) skuteczność świetlna η określona jako stosunek strumienia świetlnego (wysylanego przez źródło światła) do całkowitej mocy P , pobranej przez to źródło wraz z dodatkowym wyposażeniem niezbędnym do jego prawidłowego świecenia (zapłonniki, stateczniki) mierzona w lm/W. Skuteczność świetlna krajowych źródeł światła waha się w granicach:
 - dla żarówek (7,7...18,6) lm/W,
 - dla świetlówek miniaturowych (6,3...35,5) lm/W,
 - dla świetlówek głównego szeregu (27,4...60) lm/W,
 - dla rtęciówek ponad 60 lm/W,
 - dla sodówek wysokoprężnych (80...120) lm/W,
 - dla sodówek niskoprężnych do 200 lm/W,
- b) trwałość T mierzona w godzinach [h] określona jako suma godzin świecenia w czasie którego źródło światła spełnia wymagania norm. Trwałość znamionowa wg PN wynosi:
 - dla żarówek głównego szeregu $T_n = (1000...5000)$ h,
 - dla świetlówek zależnie od rodzaju wykonania, $T_n = (1000...10000)$ h,
 - dla rtęciówek $T_n = 6000$ h,
 - dla sodówek do 16000 h,
- c) barwa światła wynikająca z rozkładu widmowego promieniowania, określona przez porównanie z barwą referencyjnych źródeł światła,
- d) strumień świetlny w lm,
- e) temperatura barwowa w kelwinach [K],
- f) właściwości oddawania barw,
- g) czas zapłonu,
- h) dozwolone położenie pracy.

Elektryczne źródła światła przeważnie są zasilane prądem przemiennym; strumień świetlny ulega, więc zmianom z częstotliwością $2f$ zmian natężenia prądu. Od stopnia bezwładności przemiany energii elektrycznej w świetlną zależy tętnienie strumienia świetlnego. Tętnienie strumienia świetlnego powoduje szybsze zmęczenie oczu i dlatego należy dążyć, aby wartość współczynnika tętnień była bliska zeru.

Żarówki

Obecnie najczęściej stosowanym elektrycznym źródłem światła są żarówki. Wynika to z prostoty ich budowy i możliwości przystosowania do różnego rodzaju zadań oświetleniowych, niskiej ceny spowodowanej zautomatyzowaniem produkcji oraz składu widmowego promieniowania bardzo dogodnego dla oczu człowieka. Działanie żarówki jako przetwornika energii elektrycznej w świetlną polega na rozgrzaniu do wysokiej temperatury ciała stałego np. drutu platynowego, drutu lub taśmy wolframowej zwanego dalej żarnikiem. Celem zwiększenia luminancji żarnik wykonany jest w postaci zwiniętych zwojów drutu, natomiast żarnik taśmowy zapewnia jednolitą luminancję na dużej powierzchni. Połączenie żarnika z instalacją dokonuje się za

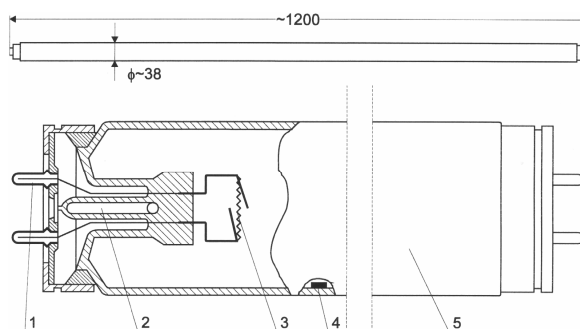


Rys. 38. Budowa żarówki: a) do 200 W, b) do 1500 W, 1 – trzonek, 2 – bańka, 3 – rurka talerzykowa, 4 – odwiewka, 5 – żarnik [opracowanie własne]

pomocą trzonka gwintowego lub bagnetowego i oprawki. Budowę żarówki przedstawiono na rys. 38. Aby uniknąć utleniania żarnika, z wnętrza bańki usuwa się powietrze. Drut wolframowy w wysokiej temperaturze ulega rozpylaniu, skutkiem tego maleją: moc żarówki i wysyłany przez nią strumień świetlny. W celu ograniczenia rozpylenia wolframu w lampach próżniowych stosuje się temperaturę żarnika nie wyższą od 2500 K. W celu uniknięcia rozpylania stosuje się również napełnianie bańki gazem obojętnym oraz formowanie żarnika w postaci skrętki zwiniętej z dwóch drutów o mniejszej średnicy. Dzięki napełnianiu bańki gazem, temperaturę żarnika można podnieść do (2600...3000) K. Obecnie żarówki o mocy do 25 W wykonuje się jako próżniowe, o mocy (40...100) W jako gazowane dwuskrętkowe, a o mocy powyżej 100 W jako gazowane jednoskrętkowe. Wielkościami znamionowymi żarówek są napięcie i moc. Skuteczność świetlna żarówek rośnie, więc wraz z ich mocą znamionową. Żarówki są bardzo wrażliwe na odchylenia wartości napięcia zasilającego od wartości znamionowej. Ze wzrostem napięcia rośnie pobierana przez żarówkę moc elektryczna i temperatura żarnika, a w konsekwencji rośnie strumień i skuteczność świetlna. Jednocześnie jednak bardzo szybko maleje trwałość.

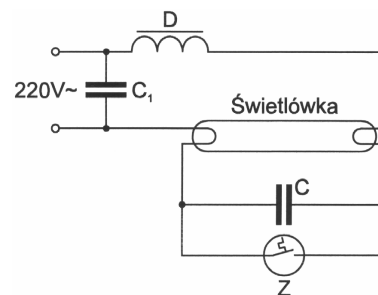
Żarówki halogenowe wprowadzono na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Podstawowym wymaganiem, które musi być spełnione dla utrzymania w żarówce nieprzerwanego cyklu halogenowego przez cały okres jej trwałości, jest tak wysoka temperatura bańki, aby powstający halogenek wolframu nie mógł się na niej skondensować i pozostawał w fazie gazowej. Powstający w niskich temperaturach lotny halogenek wolframu dyfunduje w kierunku żarnika, gdzie stężenie jego jest mniejsze. W strefie wyższych temperatur następuje dysocjacja halogenku i wolfram trafia w obręb żarnika, a wolny halogen dyfunduje z kolei w kierunku ścianki chłodniejszej, gdzie może znowu łączyć się z wolframem, który wyparował z żarnika. W ten sposób dochodzi do skutku cykl halogenowy zapobiegający osadzaniu się wolframu na bańce.

Świetlówki są niskoprężnymi lampami wyładowczymi rtęciowymi, a ich strumień świetlny jest wytwarzany głównie w warstwie luminoforu. Świetlówki liniowe mają postać rury szklanej (rys. 39) z wtopionymi dwiema elektrodami, między którymi odbywa się wyładowanie. Elektrody mogą być ewentualnie podgrzewane. Świetlówki o zimnym zapłonie zasilają się ze źródła podwyższonego napięcia a o gorącym zapłonie z sieci niskiego napięcia. W celu zapoczątkowania



Rys. 39. Świetlówka liniowa o elektrodach podgrzewanych:
1 – kołki stykowe, 2 – rurka pompowa, 3 – elektroda,
4 – rtęć, 5 – rura szklana pokryta warstwą luminoforu
[opracowanie własne]

wyładowania należy przyłożyć napięcie do elektrod rzędu 1000 V. Do podtrzymania zapoczątkowanego wyładowania wystarcza napięcie kilkudziesięciu woltów. Elektrody mają postać żarnika powleczonego, w celu ułatwienia zapłonu, substancją łatwo emitującą elektrony. Po zaświeceniu świetlówki dalsze podgrzewanie elektrod jest zbędne. Do uzyskania podwyższonego napięcia stosuje się układ przedstawiony na rys. 40. Zapłonnikiem Z jest mała lampka neonowa, w której jedną z elektrod jest pasek bimetalu. Po doprowadzeniu napięcia w zapłonniku rozwija się słabe

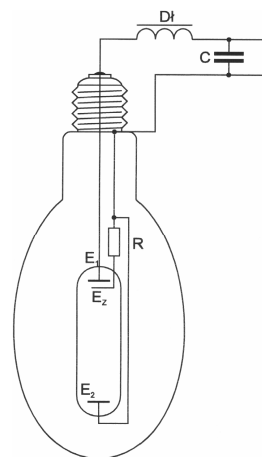


Rys. 40. Schemat świetlówki
[opracowanie własne]

wyładowanie świetlące. Elektroda bimetalowa nagrzewając się od wyładowania odgina się i dotyka drugiej elektrody. Na skutek zwarcia w obwodzie płynie dość duży prąd powodujący podgrzanie elektrod. W zwartym zapłonniku nie ma oczywiście żadnego wyładowania i elektroda bimetalowa stygnąc wraca do poprzedniego kształtu i rozwiera obwód. Przerwanie przepływu prądu powoduje powstanie dużej SEM samoindukcji w dławiku, co umożliwia zapłon świetlówki. Po zaświeceniu świetlówki napięcie na jej zaciskach wynosi ok. 110 V. Dławik znajdujący się w obwodzie świetlówki jest elementem o dużej indukcyjności i w celu jej skompensowania stosuje się kondensator C_1 tak dobrany, aby $\cos\varphi$ całego układu wynosił ok. 0,9. Ponadto, dławik jest elementem stabilizującym prąd w obwodzie świetlówki. Kondensator C ułatwia gaszenie iskry powstającej między elektrodami zapłonnika w chwili przerywania obwodu.

Rtęciówka

Lampa rtęciowa jest lampą wyładowczą, w której światło powstaje w wyniku wzbudzenia atomów rtęci. Lampa może mieć bańkę przezroczystą lub z powłoką luminoforową i wtedy światło jest wytwarzane częściowo przez wyładowanie w parach rtęci, a częściowo przez warstwę luminoforu, wzbudzanego promieniowaniem nadfioletowym. Ogólny widok rtęciówki wysokoprężnej przedstawia rys. 41. W szklanej bańce zewnętrznej umieszczono jarznik kwarcowy wykonany w postaci zamkniętej rurki. W pierwszej fazie zapłonu występuje wyładowanie między elektrodą główną E_1 a umieszczoną blisko niej elektrodą zapłonową E_Z . W trakcie tego wyładowania wzrasta temperatura jarznika powodując parowanie metalicznej rtęci. Wzrastające stężenie par rtęci zmniejsza rezystancję między elektrodami głównymi. W chwili gdy rezystancja między elektrodami



Rys. 41. Schemat lampy rtęciowej:

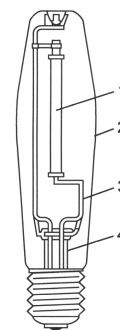
E_1, E_2 – elektrody główne,
 E_Z – elektroda zapłonowa,
 R – opornik ograniczający prąd zapłonu,
 $Dł$ – dławik, C – kondensator kompensacyjny [opracowanie własne]

głównymi E_1, E_2 stanie się mniejsza od rezystancji rezystora zapłonowego R , wyładowanie przenosi się między elektrody główne i przebiega dalej w parach rtęci. Parametry elektryczne i świetlne lampy zmieniają się aż do ustalenia warunków wyładowania. Proces ten trwa ok. 5 min., w zależności od typu lampy i temperatury otoczenia. Do prawidłowej eksploatacji świetlówki wysokoprężnej jest konieczna stabilizacja prądu podczas wyładowania w jarzniku. Stabilizację taką zapewnia szeregowe połączenie lampy ze statecznikiem indukcyjnym (dławikiem). Po zgaszeniu i ponownym włączeniu lampa rtęciowa nie od razu zaświeca – zapłon następuje dopiero po ostygnięciu jarznika, co trwa do 5 min. Lampy o świetle mieszanym powszechnie nazywane rtęciowo-żarówymi mają budowę podobną do rtęciówek wysokoprężnych. W lampach tych wokół jarznika jest rozpięta wolframowa skrętka, połączona szeregowo z jarznikiem. Lampy te nie wymagają stosowania statecznika indukcyjnego, gdyż stabilizację prądu wyładowania zapewnia żarnik wolframowy. Duży strumień świetlny i znaczna skuteczność świetlna to główne zalety lamp rtęciowych. Zastosowanie odpowiednich luminoforów pozwala na poprawę barwy światła. Również światło żarnika w lampach o świetle mieszanym wzbogaca światło lampy rtęciowej, dając wypadkowe światło o lepszym składzie widmowym. Dzieje się to jednak poprzez zmniejszenie ich skuteczności świetlnej.

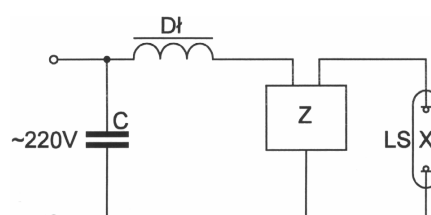
Sodówka

Konstrukcja lampy sodowej wysokoprężnej (rys. 42) jest podobna do lampy rtęciowej. Jarznik wypełniony odpowiednią porcją sodu i rtęci jest zamocowany w zamkniętej bańce szklanej, w której panuje próżnia. Wysokoprężna lampa sodowa, jak każda lampa wyładowcza, wymaga zastosowania statecznika (jest nim najczęściej dławik). Aby został zainicjowany w jarzniku łuk, musi być zainstalowany zapłonnik. W tym celu stosuje się zapłonniki tyrystorowe, wytwarzające impulsy wysokiego napięcia (rys. 43). W miarę nagrzania jarznika następuje parowanie sodu i rtęci. Rozruch lampy trwa zwykle ok. 5 min. lub mniej. Wysokoprężna sodówka transformuje około 30% energii elektrycznej dostarczonej do obwodu lampy na promieniowanie widzialne. W rezultacie źródła te osiągają bardzo wysoką skuteczność świetlną wynoszącą. Niezależnie od wysokiej sprawności energetycznej światło lampy sodowej jest emitowane głównie поблизу maksymalnej czułości oka ludzkiego.

W świetle lampy sodowej wzrasta ostrość widzenia, dlatego są one zalecanym źródłem światła do oświetlenia dróg o dużym nasileniu ruchu kołowego. Wadą lampy sodowej jest mała możliwość rozróżniania barw, szczególnie fioletowych, niebieskich i zielonych; obiekty wydają się zszarzałe. Nie zaleca się oświetlania lampami sodowymi przy pracach precyzyjnych lub wymagających dobrego zróżnicowania barw, np. w przemyśle tekstylnym, farbiarskim, itp.



Rys. 42. Lampa sodowa:
1 – jarznik, 2 – bańka zewnętrzna, 3 – wspornik, 4 – nóżka szklana z przepustami prądowymi. [opracowanie własne]



Rys. 43. Schemat lampy sodowej z zapłonnikiem tyrystorowym: LS – wysokoprężna lampasodowa, Dł – dławik, Z – zapłonnik tyrystorowy, C – kondensator kompensacyjny. [opracowanie własne]

4.7.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jaka jest definicja światła?
2. Jakie znasz podstawowe pojęcia techniki świetlnej?
3. Jakie znasz powszechnie stosowane źródła światła?
4. Jak jest zbudowana i jak działa żarówka?
5. Jakie są wielkości znamionowe żarówek?
6. Jak jest zbudowana i jak działa świetlówka?
7. Jak jest zbudowana i jak działa rtęciówka?
8. Jak jest zbudowana i jak działa sodówka?
9. Jakie wielkości służą do oceny elektrycznych źródeł światła?

4.7.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz wartości rezystancji nagranych żarówek o mocy $P_1 = 40 \text{ W}$, $P_2 = 60 \text{ W}$, $P_3 = 100 \text{ W}$ i napięciu znamionowym $U_n = 230 \text{ V}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą źródeł światła.

Ćwiczenie 2

Określ, która żarówka będzie świeciła jaśniej, jeżeli połączono szeregowo dwie żarówki o napięciu znamionowym $U_n = 230 \text{ V}$, mocy $P_1 = 40 \text{ W}$, $P_2 = 100 \text{ W}$ i podłączono je do źródła napięcia o $U = 230 \text{ V}$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

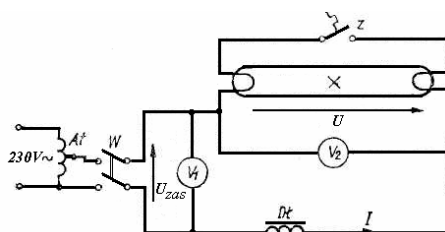
- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą źródeł światła.

Ćwiczenie 3

Wyznacz charakterystykę napięciową $U = f(U_{zas})$ wyłączania świetlówki w układzie przedstawionym na rysunku.



Rysunek do ćwiczenia 3

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) obejrzeć elementy układu świetlówki: zapłonnik, statecznik (dławiki), świetlówka,

- 2) połączyć układ jak na rysunku,
- 3) doprowadzić napięcie do układu poprzez zamknięcie wyłącznika W,
- 4) zmieniać wartość napięcia zasilania U_{zas} (np. co 10 V) za pomocą autotransformatora At od 230 V do wartości, przy której świetlówka zgaśnie, odczytując na woltomierzu V_2 wartość spadku napięcia U na świetlówce i notować je w tabeli,
- 5) ustalić wartości napięć U_{zas} i U przy których świetlówka jeszcze świeci.

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- autotransformator,
- woltomierze elektromagnetyczne,
- wyłącznik,
- zeszyt, długopis, linijka,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą źródeł światła.

4.7.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyjaśnić, co to jest światło?	☐	☐
2) wymienić podstawowe pojęcia techniki świetlnej?	☐	☐
3) wymienić wielkości pozwalające ocenić elektryczne źródła światła?	☐	☐
4) wyjaśnić zasadę działania żarówki?	☐	☐
5) wymienić wielkości znamionowe żarówki?	☐	☐
6) narysować układ pracy świetlówki i omówić go?	☐	☐
7) wyjaśnić co to jest zapłonnik i statecznik?	☐	☐
8) wyjaśnić zasadę działania rtęciówki?	☐	☐
9) scharakteryzować zasadę działania sodówki?	☐	☐

4.8. Pomiary wielkości elektrycznych

4.8.1. Materiał nauczania

Pomiar określamy jako porównanie wartości mierzonej wielkości fizycznej z pewną jej wartością, przyjętą za jednostkę. W technice pomiarów elektrycznych stosuje się metody pomiarowe odchyłowe i zerowe.

Metody odchyłowe dzielimy na bezpośrednie i porównawcze. Metoda bezpośrednia polega na odczycie wskazania przyrządu, np. prądu na amperomierzu, porównawcza polega na porównaniu dwóch wartości, np. napięcia na połączonych szeregowo rezystorach znanym i mierzonym.

Metody zerowe polegają na doprowadzeniu do zaniku prądu w kontrolnej części układu i wyznaczeniu nie znanej rezystancji w metodzie mostkowej lub nie znanej SEM w metodzie kompensacyjnej, na podstawie innych znanych warunków w układzie.

Wartość mierzonej wielkości fizycznej uzyskana z pomiaru W_w może różnić się od wartości rzeczywistej W_r . Różnicę tę nazywamy błędem (uchybem) bezwzględnym i oznaczamy Dp , czyli

$$Dp = W_w - W_r$$

Do oceny jakości pomiaru wprowadzamy pojęcie błędu względnego pomiaru, wyrażonego w % wartości rzeczywistej

$$\delta = \frac{W_w - W_r}{W_r} 100\%$$

Dokładność miernika określana jest przez największy dopuszczalny błąd względny miernika δ_{max}

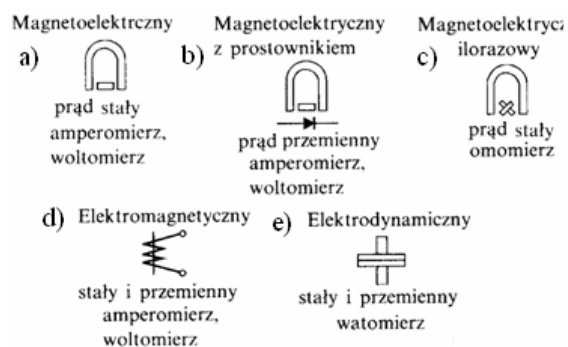
$$\delta_{max} \% = \frac{W_w - W_r}{W_{max}} 100\%$$

Wzór ten określa tzw. klasę dokładności. Mamy następujące klasy dokładności: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5. Dla miernika klasy 0,5 błąd δ_{max} jest równy 0,5%; klasy 5, 5%. Zakres pomiarowy miernika powinien być zawsze tak dobrany, aby wychylenie wskazówki w czasie pomiarów było możliwie duże.

Stała miernika dla danego zakresu pomiarowego, jest to stosunek zakresu pomiarowego W_{max} do liczby działek podziałki n

$$C = \frac{W_{max}}{n}$$

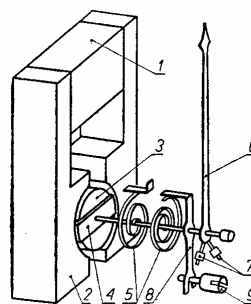
Aby otrzymać wartość wielkości mierzonej należy liczbę działek odpowiadającej odchyleniu wskazówki pomnożyć przez stałą miernika. Mierniki ze względu na zasadę działania dzielimy na magnetoelektryczne, elektromagnetyczne, elektrodynamiczne, indukcyjne i ciepłone; ze względu na rodzaj prądu na przyrządy na prąd stały, na prąd przemienny i uniwersalne; ze względu na mierzoną wielkość mamy: woltomierze (pomiar napięcia), amperomierze (pomiar prądu), watomierze (pomiar mocy), omomierz (pomiar rezystancji). Symbole graficzne mierników pokazano na rys. 44.



Rys. 44. Symbole graficzne mierników elektrycznych
[opracowanie własne]

Mierniki magnetoelektryczne

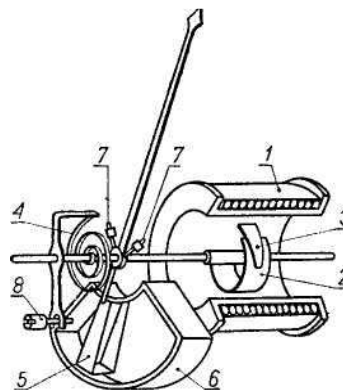
Miernikami magnetoelektrycznymi nazywamy mierniki, w których odchylenie organu ruchomego następuje w wyniku współdziałania pola magnetycznego magnesu trwałego i ruchomej cewki, przez którą płynie prąd (rys. 45). Magnes trwały z nabiegunnikami, wykonanymi ze stali magnetycznie miękkiej, stanowi element nieruchomy miernika. Organem ruchomym jest cewka nawinięta cienkim przewodem miedzianym, izolowanym. Cewka jest ułożyskowana w taki sposób, aby jej oś obrotu pokrywała się z osią geometryczną szczeliny obwodu magnetycznego. Do cewki jest przymocowana wskazówka. Kąt nachylenia cewki jest proporcjonalny do prądu płynącego przez tę cewkę. Kąt ten określa się za pomocą wskazówki przesuwającej się wzdłuż podziałki. Miernik magnetoelektryczny jest typowym miernikiem prądu stałego reagującym na zwrot przepływającego prądu. Dlatego też w miernikach magnetoelektrycznych zaznacza się biegunowość jednego z zacisków, np. zacisku plus (+). Mierniki tego typu mogą być używane jako amperomierze lub jako woltomierze. Zaletami mierników magnetoelektrycznych są: duża czułość, mały pobór mocy oraz duża dokładność. Z uwagi na to, że mierniki te nie reagują bezpośrednio na przepływ prądu przemiennego, którego wartość średnia jest równa zero, konieczne jest wyprostowanie prądu przed doprowadzeniem go, do cewki miernika. W tym celu używa się prostowników. W miernikach elektrycznych prostownikowych stosuje się zwykle układ mostkowy, złożony z czterech diod. Mierniki magnetoelektryczne prostownikowe są używane powszechnie jako mierniki uniwersalne, tj. woltamperomierze z przełącznikiem do pomiarów przy prądzie stałym i przemiennym.



Rys. 45. Budowa miernika magnetoelektrycznego:
1 – magnes trwały, 2 – nabiegunniki,
3 – rdzeń, 4 – cewka ruchoma, 5 – sprężyny zwracające, 6 – wskazówka, 7 – ciężarki równoważące, 8 – dźwignia nastawki zerowej, 9 – pokrętko nastawki zerowej [opracowanie własne]

Mierniki elektromagnetyczne

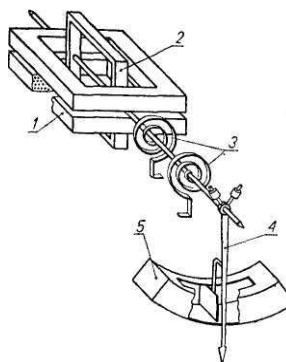
Zasada działania miernika elektromagnetycznego (rys. 46) polega na oddziaływaniu pola magnetycznego cewki przewodzącej prąd, na ruchomy rdzeń lub rdzenie ferromagnetyczne umieszczone w tym polu. Wskazówka połączona z rdzeniem wskazuje wartość prądu przepływającego przez cewkę. Im większy prąd przepływa przez cewkę, tym silniej jest wciągany rdzeń, tym większy jest moment i większe odchylenie wskazówki. Miernik elektromagnetyczny służy zarówno do pomiaru prądu stałego, jak i wartości skutecznej prądu przemiennego. Jednak ze względu na wielokrotnie większy pobór mocy niż w przypadku miernika magnetoelektrycznego są one stosowane tylko do pomiarów prądu przemiennego. Mierniki elektromagnetyczne są budowane jako amperomierze i jako woltomierze. Mają nieskomplikowaną budowę i charakteryzują się pewnością działania.



Rys. 46. Budowa miernika elektrodynamicznego;
1 – cewka, 2 – rdzeń ruchomy, 3 – rdzeń nieruchomy, 4 – sprężyna zwracająca, 5 – skrzydełko tłumika, 6 – komora tłumika, 7 – ciężarki równoważące, 8 – pokrętko nastawki zerowej [opracowanie własne]

Mierniki elektrodynamiczne

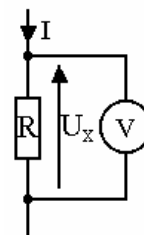
Miernikami elektrodynamicznymi nazywamy mierniki, których odchylenie organu ruchomego następuje w wyniku oddziaływania elektrodynamicznego dwóch cewek, przez które płyną prądy (rys. 47). Cewka ruchoma osadzona na osi, do której jest przymocowana wskazówka, znajduje się wewnątrz cewki nieruchomej. W wyniku oddziaływania elektrodynamicznego cewek powstają siły wytwarzające moment napędowy. Moment ten jest równoważony przez moment zawierający dwóch sprężyn spiralnych, doprowadzających jednocześnie prąd do cewki ruchomej. Mierniki elektrodynamiczne są używane jako amperomierze, woltomierze, watomierze do pomiarów przy prądzie stałym i przemiennym. Mierniki elektrodynamiczne odznaczają się dużą dokładnością, ale mają delikatną budowę. Dlatego też są przeważnie używane jako przyrządy laboratoryjne wysokiej klasy (kl. 0,1; 0,2; 0,5). W watomierzu elektrodynamicznym cewka nieruchoma jest cewką prądową i jest włączona w obwód tak jak amperomierz. Cewka ruchoma jest cewką napięciową i jest włączona w obwód tak jak woltomierz.



Rys. 47. Zasada budowy miernika elektrodynamicznego: 1 – cewka prądowa nieruchoma, 2 – cewka napięciowa ruchoma, 3 – sprężyny, 4 – wskazówka, 5 – tłumik
[opracowanie własne]

Pomiary napięcia

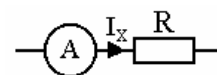
Napięcie elektryczne mierzy się za pomocą przyrządów zwanych woltomierzami. Woltomierze magnetoelektryczne – symbol rys. 44a – służą do pomiarów napięć stałych. Woltomierze elektromagnetyczne – symbol rys. 44d, elektrodynamiczne – symbol rys. 44e i magnetoelektryczne prostownikowe – symbol rys. 44b, służą do pomiarów wartości skutecznej napięć sinusoidalnie zmiennych o częstotliwości sieciowej 50 Hz. Każdy przyrząd ma zaciski, które za pomocą przewodów łączy się z odpowiednimi punktami obwodu elektrycznego. Na skali znajduje się symbol jednostki wielkości mierzonej, w tym przypadku litera V. Oprócz tego przyrząd wyposażony jest w przełącznik zakresów. Każdej pozycji przełącznika odpowiada cyfra oznaczająca zakres wartości wielkości mierzonej. Często zamiast przełącznika spotyka się dodatkowe zaciski również opisane cyframi oznaczającymi zakres. Woltomierze przeznaczone do pomiarów napięć stałych mają jeden zacisk oznaczony symbolem „+”. Łączymy go z punktem obwodu elektrycznego, którego potencjał jest wyższy niż potencjał innego punktu obwodu połączonego z drugim zaciskiem woltomierza. Woltomierz przyłącza się do obwodu pomiarowego zawsze równolegle. Jeśli chcemy zmierzyć spadek napięcia na oporniku R , przez który płynie prąd I , dołączamy woltomierz w sposób pokazany na rys. 48.



Rys. 48. Sposób przyłączenia woltomierza
[opracowanie własne]

Pomiary prądu

Prąd elektryczny mierzy się za pomocą przyrządów zwanych amperomierzami. Amperomierze mogą być przeznaczone w zależności od typu ustroju (patrz pomiary napięcia) do pomiarów prądu stałego, albo wartości skutecznej prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz. Na skali znajduje się



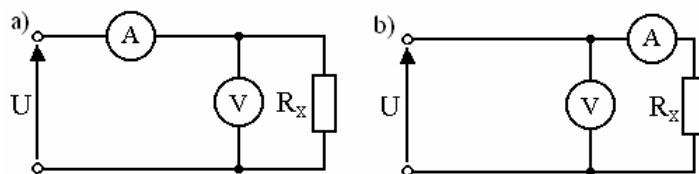
Rys. 49. Sposób włączenia amperomierza
[opracowanie własne]

symbol jednostki wielkości mierzonej, w tym przypadku litera A. Amperomierze przeznaczone do pomiarów prądów stałych mają jeden zacisk oznaczony symbolem „+”, aby go włączyć prawidłowo do obwodu. Amperomierz włącza się do układu zawsze szeregowo i w celu zmierzenia prądu płynącego w oporniku R łączymy go w sposób pokazany na rys. 49

Pomiary rezystancji

Pomiary rezystancji można dokonać metodą bezpośrednią jak i metodami pośrednimi. Metoda bezpośrednia polega na odczycie wartości wielkości mierzonej z tarczy podziałowej przyrządu przeznaczonego tylko do pomiaru danej wielkości. Przyrządami służącymi do pomiarów rezystancji są omomierze. Pomiaru dokonuje się przez dołączenie końcówek rezystora do zacisków omomierza i odczycie wartości rezystancji.

Metoda pośrednia, zwana techniczną polega na zestawianiu różnych przyrządów pomiarowych i elementów w układ pomiarowy. Za pomocą takiego układu wyznacza się wielkości pomocnicze, które służą do wyznaczania (obliczania) wartości poszukiwanej wielkości. Metoda techniczna pomiaru rezystancji może być realizowana przy użyciu woltomierza i amperomierza, woltomierza i watomierza, amperomierza i watomierza. Metoda pomiaru rezystancji wykorzystująca amperomierz i woltomierz jest metodą najbardziej rozpowszechnioną. Ten sposób pomiaru, wynika wprost z prawa Ohma. Stosowane są dwa układy pomiarowe: do pomiaru rezystancji małych (rys. 50a) i do pomiaru rezystancji dużych (rys. 50b).



Rys. 50. Układ do pomiaru rezystancji metodą techniczną: a) małych; b) dużych [opracowanie własne]

Jeżeli przez R_A oznaczmy rezystancję wewnętrzną amperomierza, a przez R_V rezystancję wewnętrzną woltomierza to dla $R_x \ll \sqrt{R_A R_V}$ stosujemy układ do pomiaru rezystancji małych (małych w porównaniu z rezystancją woltomierza R_V), a przy $R_x \gg \sqrt{R_A R_V}$ stosujemy układ do pomiaru rezystancji dużych (dużych w porównaniu z rezystancją amperomierza R_A). Gdy $R_x = \sqrt{R_A R_V}$ oba układy są równoważne.

Pomiary pojemności

Pomiary mogą być wykonane metodą techniczną (rys. 51) z użyciem woltomierza i amperomierza, tak jak przy pomiarach rezystancji. Układ pomiarowy będzie taki sam, tylko zamiast rezystora będzie kondensator. Pojemność kondensatora oblicza się na podstawie pomiaru reaktancji kondensatora X_C . I tak

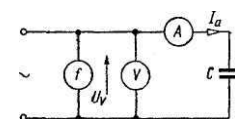
$$Z = \frac{U_V}{I_A}$$

pomijając straty w dielektryku otrzymamy

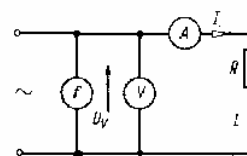
$$Z = X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

a stąd

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$



Rys. 51. Układ do pomiaru pojemności metodą techniczną [opracowanie własne]



Rys. 52. Układ do pomiaru indukcyjności metodą techniczną [opracowanie]

Pomiary indukcyjności

Pomiary cewki przeprowadzamy w ten sam sposób (rys. 52). Mierzac U i I obliczamy:

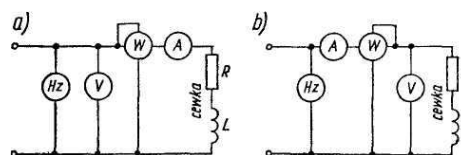
$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

a stąd:

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Rezystancję R cewki wyznaczamy metodą techniczną używając źródła prądu stałego albo mierząc moc czynną w obwodzie prądu przemiennego (rys. 53), a następnie obliczamy rezystancję ze wzoru:

$$R = \frac{P}{I^2}$$

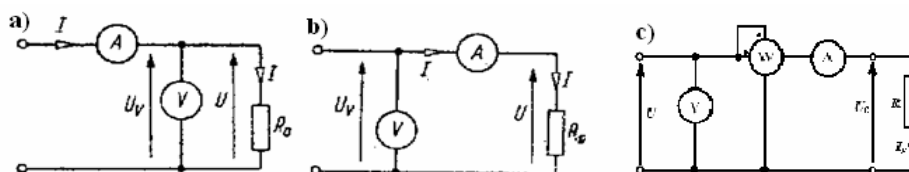


Rys. 53. Pomiar rezystancji cewki metodą techniczną przy prądzie zmiennym; a), b) układy pomiarowe [opracowanie własne]

Pomiary mocy prądu stałego

Moc prądu stałego mierzymy bezpośrednio watomierzem elektrodynamicznym (rys. 54c) lub pośrednio, metodą techniczną, przez pomiar prądu i napięcia (rys. 54a,b). Moc pobrana przez odbiornik $P = UI$

Pomiary mocy prądu przemiennego jednofazowego



Rys. 54. Pomiar mocy prądu stałego metodą: a), b) techniczną; c) bezpośrednią [opracowanie własne]

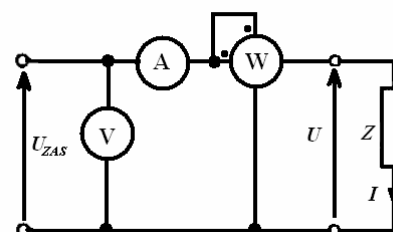
W obwodach prądu przemiennego jednofazowego występują trzy rodzaje mocy:

moc czynna $P = UI \cos \varphi$

moc bierna $Q = UI \sin \varphi$

moc pozorna $S = UI$

Układ do pomiaru mocy w obwodach prądu przemiennego jednofazowego przedstawiono na rys. 55.

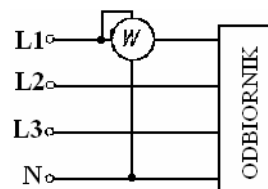


Rys. 55. Układ do pomiaru mocy w obwodach prądu przemiennego jednofazowego [opracowanie własne]

Pomiary mocy czynnej w układach trójfazowych

Pomiaru mocy czynnej w układach trójfazowych dokonuje się za pomocą watomierzy elektrodynamicznych lub indukcyjnych. W układzie trójfazowym, obciążonym symetrycznie, moc czynna pobierana przez każdą z faz jest taka sama. Wystarczy zmierzyć moc czynną dowolnej fazy, ponieważ moc czynna układu jest trzy razy większa, tzn. $P = 3P_f$. Przy pomiarach cewka prądowa watomierza jest włączona w dowolną fazę. Początek cewki napięciowej jest połączony z początkiem cewki prądowej, koniec zaś jest przyłączony do przewodu lub do punktu neutralnego zerowego układu, jak pokazano na rys. 56 (na cewce napięciowej występuje napięcie fazowe).

W przypadku odbiorników skojarzonych w trójkąt, punkt neutralny tworzy się w sposób sztuczny (rys. 57)



Rys. 56. Pomiar mocy czynnej w układzie trójfazowym symetrycznym (metoda jednego watomierza) [opracowanie własne]

za pomocą rezystancji. Wartości tych rezystancji muszą spełniać równanie $R = R_{wn}$, gdzie R_{wn} – rezystancja cewki napięciowej watomierza.

W układzie trójfazowym, trójprzewodowym, obciążonym niesymetrycznie moc czynną mierzy się metodą dwóch watomierzy w tzw. układzie Arona (rys. 58). Cewki prądowe tych watomierzy są włączone w dwie dowolne fazy. Początki cewek napięciowych są połączone z początkami odpowiednich cewek prądowych, końce cewek napięciowych są przyłączone do trzeciego przewodu (na cewkach napięciowych występuje napięcie międzyprzewodowe). Moc czynna takiego układu

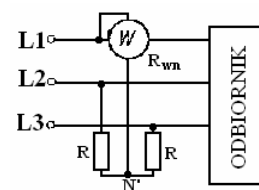
$$P = P_1 + P_2,$$

przy czym P_1, P_2 – wskazania watomierzy.

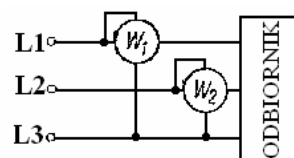
W układzie trójfazowym, czteroprzewodowym, obciążonym niesymetrycznie moc czynną mierzy się metodą trzech watomierzy (rys. 59). Cewki prądowe włączone są w trzy fazy. Początki cewek napięciowych połączone są z początkami odpowiednich cewek prądowych, końce cewek napięciowych są przyłączone do przewodu neutralnego (na cewkach napięciowych występuje napięcie fazowe). Moc czynna układu

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

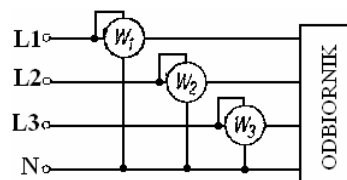
przy czym P_1, P_2, P_3 – wskazania watomierzy.



Rys. 57. Sztuczny punkt neutralny
[opracowanie własne]



Rys. 58. Pomiar mocy czynnej w układzie trójfazowym, trójprzewodowym (metoda dwóch watomierzy)
[opracowanie własne]



Rys. 59. Pomiar mocy czynnej w układzie trójfazowym, czteroprzewodowym
[opracowanie własne]

4.8.2. Pytania sprawdzające

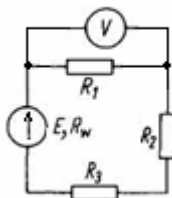
Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co to jest pomiar bezpośredni, a co pośredni?
2. Co to jest błąd bezwzględny?
3. Co to jest błąd względny?
4. Co to jest klasa dokładności miernika?
5. Jak zbudowany jest ustrój magnetoelektryczny?
6. Jak zbudowany jest ustrój elektromagnetyczny?
7. Jak zbudowany jest ustrój elektrodynamiczny?
8. Jak należy włączać woltomierz i amperomierz do wykonania pomiarów?
9. Jakimi metodami można mierzyć rezystancję?
10. Jak mierzy się indukcyjność i pojemność elementów metodą techniczną?
11. Jak mierzy się moc prądu stałego a jak czynną prądu jednofazowego?
12. Jak mierzy się moc pobieraną przez odbiornik trójfazowy symetryczny?
13. Jak mierzy się moc pobieraną przez odbiornik trójfazowy niesymetryczny?

4.8.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Oblicz, jakie będzie wskazanie woltomierza po zwarciu rezystora R_2 , jeżeli woltomierz w obwodzie pokazanym rysunku wskazuje wartość napięcia $U=8$ V. Wartości rezystancji obwodu: $R_1 = 4 \Omega$, $R_2 = 7 \Omega$, i $R_3 = 5 \Omega$, $R_w = 1 \Omega$.



Rysunek do
ćwiczenia 1

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

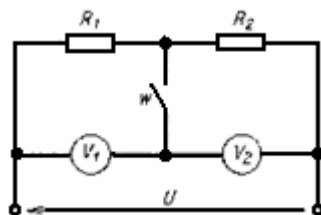
- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą pomiarów wielkości elektrycznych.

Ćwiczenie 2

Oblicz wskazania woltomierzy, gdy wyłącznik jest otwarty oraz gdy jest zamknięty. Dane obwodu: $R_{v1} = 30 \text{ k}\Omega$, $R_{v2} = 20 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$, napięcie $U = 30$ V.



Rysunek do ćwiczenia 2

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

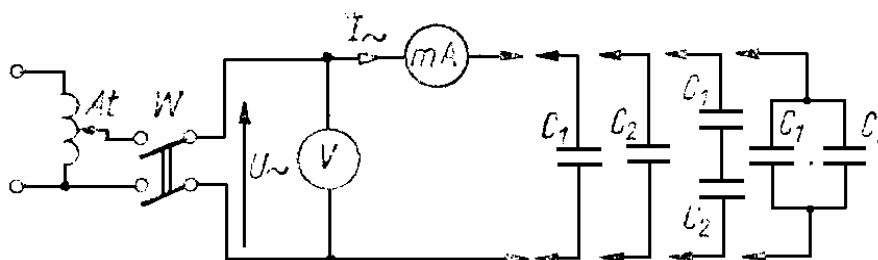
- 1) odszukać wzory,
- 2) wykonać obliczenia,
- 3) opisać występujące zjawisko.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- zeszyt, długopis,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą pomiarów wielkości elektrycznych.

Ćwiczenie 3

Przeprowadź pomiary pojemności metodą techniczną w układzie przedstawionym na rysunku.



Rysunek do ćwiczenia 3

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienś:

- 1) zestawić układ pomiarowy, którego schemat przedstawiony jest na rysunku,
- 2) po połączeniu układu, przed załączeniem napięcia zasilającego zwrócić się do nauczyciela o sprawdzenie poprawności wykonanych połączeń,
- 3) przy otwartym wyłączniku W ustawić pokrętkę autotransformatora w położeniu zerowym,
- 4) dołączyć badaną pojemność C_1 i zamknąć wyłącznik W ,
- 5) pokrętkę autotransformatora ustawić trzy różne wartości napięcia U , zwracając uwagę aby nie przekroczyć wartości napięcia znamionowego badanego kondensatora,
- 6) dla każdej wartości napięcia i prądu z punktu piątego zanotować wskazania woltomierza i amperomierza w poniższej tabeli i obliczyć wartość pojemności ze wzoru podanego w tym rozdziale,
- 7) pokrętkę autotransformatora ustawić na zero, otworzyć wyłącznik W , dołączyć następną gałąź z kondensatorem C_2 (następnie C_1 i C_2 połączone szeregowo i równolegle) i powtórzyć pomiary,
- 8) wyniki pomiarów porównać z wynikami obliczeń wykonanych za pomocą wzorów na szeregowe i równoległe łączenie kondensatorów:

szeregowe połączenie kondensatorów

równoległe połączenie kondensatorów

$$C_{zs} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C_{zr} = C_1 + C_2$$

Tabela do ćwiczenia 3

J = ...H _z		Kondensator C ₁			Kondensator C ₂			Kondensator C ₁ + C ₂						
								Połączone szeregowo			Połączone równoległe			
U	V													
I	mA													
C	μF													
C _{śr}	μF													
					C _{obi}		μF							

Wypożyczenie stanowiska pracy:

- amperomierz,
- woltomierz,
- wyłącznik,
- autotransformator,
- przewody do wykonywania połączeń,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotycząca pomiarów wielkości elektrycznych.

4.8.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) zdefiniować pomiar bezpośredni i pośredni?	☐	☐
2) zdefiniować błąd bezwzględny pomiaru?	☐	☐
3) zdefiniować błąd względny pomiaru?	☐	☐
4) zdefiniować klasę dokładności miernika?	☐	☐
5) wyjaśnić zasadę działania ustroju magnetoelektrycznego?	☐	☐
6) wyjaśnić zasadę działania ustroju elektromagnetycznego?	☐	☐
7) wyjaśnić zasadę działania ustroju elektrodynamicznego?	☐	☐
8) włączyć amperomierz i woltomierz dla wykonania pomiarów w obwodzie prądu stałego?	☐	☐
9) narysować układy do pomiaru mocy prądu stałego?	☐	☐
10) zmierzyć rezystancję metodą bezpośrednią i pośrednią?	☐	☐
11) zmierzyć prąd i napięcie zmienne w układzie?	☐	☐
12) zmierzyć indukcyjność, pojemność?	☐	☐
13) zmierzyć moc czynną odbiornika jednofazowego?	☐	☐
14) zmierzyć moc czynną odbiornika 3-fazowego symetrycznego?	☐	☐
15) zmierzyć moc czynną odbiornika 3-fazowego niesymetrycznego?	☐	☐

4.9. Maszyny elektryczne i transformatory

4.9.1. Materiał nauczania

Maszyny elektryczne wirujące są urządzeniami przeznaczonymi do przetwarzania energii mechanicznej na energię elektryczną (prądnice) lub odwrotnie — energii elektrycznej na mechaniczną (silniki); mogą również służyć do zmiany parametrów energii elektrycznej: napięcia i częstotliwości (przetwornice). Transformatory, będące urządzeniami bez części wirujących, służą do zmiany wartości napięcia przy zachowaniu stałej częstotliwości i są stosowane tylko w obwodach prądu zmiennego. Działanie maszyn elektrycznych opiera się na zjawisku indukcji elektromagnetycznej, dynamicznym oddziaływaniu pola magnetycznego na przewodnik z prądem.

Transformatory

Transformator energetyczny jest to urządzenie elektromagnetyczne statyczne, służące do przetwarzania energii elektrycznej prądu przemiennego o określonym napięciu na energię elektryczną o innym napięciu. Transformator wykonuje się jako jednowzwojeniowe (autotransformatory), dwuwzwojeniowe i wielowzwojeniowe. Transformatory mogą pracować jako podwyższające lub jako obniżające napięcie, w związku z tym mówimy o stronie napięcia górnego i stronie napięcia dolnego. W transformatorze obniżającym strona napięcia górnego jest stroną pierwotną, a dolnego wtórną. W transformatorze podwyższającym jest na odwrót.

Zasada działania transformatora

Transformator składa się z rdzenia oraz umieszczonych na nim uzwojeń: pierwotnego i wtórnego. W celu zmniejszenia strat na prądy wirowe i histerezę rdzeń transformatora wykonany jest z pakietu izolowanych między sobą blach stalowych nakrzemionych o grubości 0,35 mm (tzw. blacha transformatorowa). Pionowe części rdzenia, na których nawinięte są uzwojenia, nazywa się kolumnami. Poziome części rdzenia, łączące kolumny, nazywa się jarzmami (rys. 60). Uzwojenie pierwotne o liczbie zwojów N_1 przyłączone jest do źródła prądu przemiennego. Do uzwojenia wtórnego o liczbie zwojów N_2 przyłącza się odbiorniki. Gdy $N_1 > N_2$ transformator obniża napięcie, a gdy $N_1 < N_2$ podwyższa. Gdy uzwojenie pierwotne transformatora zasilane jest ze źródła napięcia o przebiegu sinusoidalnym, wówczas strumień indukowany w rdzeniu ma również przebieg sinusoidalny, wyrażony równaniem $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, zamykający się w rdzeniu transformatora. Strumień ten indukuje w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym siły elektromotoryczne:

$$E_1 = U_1 = 4,44 N_1 f \Phi_m$$

$$E_2 = U_2 = 4,44 N_2 f \Phi_m$$

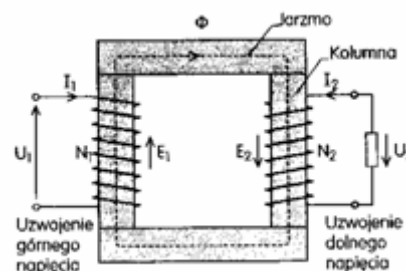
Stosunek napięć strony pierwotnej i wtórnej, równy stosunkowi liczby zwojów obu uzwojeń nazywamy przekładnią napięciową

$$n_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ponieważ moce pozorne obu uzwojeń są w przybliżeniu równe,

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad \text{to}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{n_u}$$



Rys. 60. Budowa transformatora jednofazowego [opracowanie własne]

Stan jałowy transformatora – uzwojenie pierwotne zasilane jest napięciem znamionowym U_1 a uzwojenie wtórne pozostaje rozwarne, a więc $I_2 = 0$. W uzwojeniu pierwotnym płynie prąd I_{10} zwany prądem jałowym. Moc czynna $P_0 = U_1 I_{10} \cos \varphi_0$ jest zużywana na pokrycie strat w żelazie:

$$P_0 = DP_{Fe}$$

Stan obciążenia transformatora – jest to normalny stan pracy transformatora. Do jego zacisków wtórnych przyłączony jest odbiornik energii elektrycznej. Przy wzroście obciążenia wartość prądu I_2 wzrasta, powodując wzrost strat mocy i obniżanie się napięcia na wyjściu transformatora. Całkowite straty mocy w transformatorze są sumą strat w żelazie i miedzi:

$$DP = DP_{Cu} + DP_{Fe}$$

Sprawność transformatora jest określana jako stosunek mocy czynnej oddawanej przez uzwojenie wtórne do mocy czynnej pobieranej przez uzwojenie pierwotne:

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + DP)$$

Moc znamionowa transformatora jest to moc pozorna:

$$S = U_1 I_1 = U_2 I_2$$

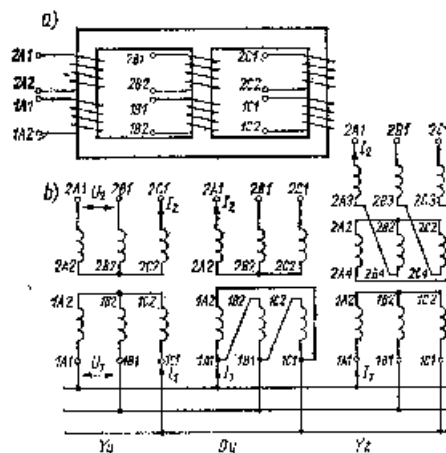
Stan zwarcia transformatora

Stan zwarcia występuje wówczas, gdy podczas zasilania jednego z uzwojeń drugie jest zwarte. Gdyby napięcie zasilające było równe znamionowemu, prądy w uzwojeniach transformatora osiągałyby wartości $20 \div 30 I_n$. Wydzielające się duże ilości ciepła doprowadziłyby w krótkim czasie do zniszczenia izolacji, a występujące naprężenia mechaniczne do deformacji konstrukcji. Wynika stąd, że długotrwałe próby na transformatorze będącym w stanie zwarcia mogą być dokonywane tylko przy odpowiednio niskim napięciu zasilającym. Charakterystyczną jego wartością jest tzw. znamionowe napięcie zwarcia; jest to taka wartość napięcia, jaką należy doprowadzić do uzwojenia pierwotnego transformatora, aby w zwartym uzwojeniu wtórnym popłynął prąd znamionowy. W stanie zwarcia prąd płynący przez transformator jest ograniczony tylko impedancją Z_T transformatora.

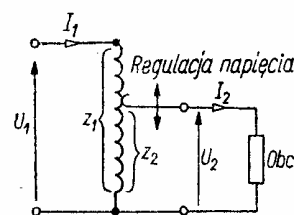
Transformator trójfazowy

Rdzeń transformatora trójfazowego (rys. 61) składa się zwykle z trzech kolumn. Na każdej kolumnie są nawinięte po dwa uzwojenia, z których jedno jest uzwojeniem pierwotnym, a drugie wtórnym. Sposoby łączenia są oznaczone literami, przy czym duże litery dotyczą uzwojeń górnego napięcia, a małe dolnego. Uzwojenia górnego napięcia łączy się zwykle w gwiazdę (Y) lub w trójkąt (D), uzwojenia dolnego napięcia w gwiazdę (y), trójkąt (d), lub zygzak (z). Uzwojenie w zygzak stosuje się przy niesymetrycznych obciążeniach.

Autotransformator jest transformatorem o jednym uzwojeniu, którego część jest uzwojeniem niższego napięcia. Może on służyć jako transformator obniżający lub podwyższający, lub jako regulator napięcia od zera do wartości napięcia pierwotnego i wyżej. Układ i zasadę działania autotransformatora o regulowanej przekładni



Rys. 61. Transformator trójfazowy:
a) budowa, b) sposoby połączeń
[opracowanie własne]



Rys. 62. Układ i zasada działania autotransformatora
[opracowanie własne]

przedstawiono na rys. 62. Do autotransformatorów stosuje się teorię transformatorów. Nie w każdym układzie może być stosowany autotransformator ze względu na galwaniczne połączenie obydwu jego stron, co w pewnych przypadkach może być niebezpieczne dla człowieka. Autotransformatory mogą być wykonywane jako jednofazowe lub trójfazowe.

Maszyny elektryczne

Każda maszyna elektryczna powinna mieć tabliczkę znamionową zawierającą dane techniczne i eksploatacyjne, z których najważniejsze to: 1) nazwa wytwórcy, 2) numer fabryczny lub oznaczenie typu i rok wykonania, 3) moc znamionowa (dla silnika jest to moc mechaniczna na wale, dla prądnicy moc elektryczna na zaciskach), 4) napięcie znamionowe, 5) prąd znamionowy, 6) rodzaj prądu (stały, przemienny), 7) częstotliwość znamionowa i liczba faz dla maszyn prądu przemiennego, 8) prędkość znamionowa lub zakres prędkości, 9) klasa ciepłoodporności izolacji lub dopuszczalny przyrost temperatury, 10) współczynnik mocy dla maszyn prądu przemiennego, 11) stopień ochrony, 12) oznaczenie stopnia ochrony składa się z liter IP oraz dwóch cyfr.

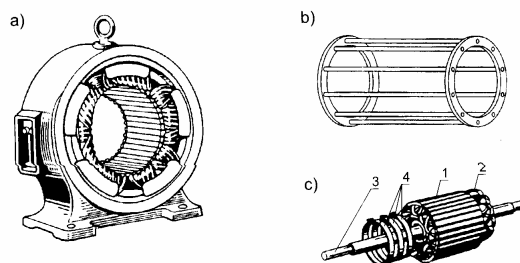
Rozróżnia się następujące rodzaje pracy maszyn w zależności od charakteru obciążenia i czasu pracy: S1-praca ciągła, S2-praca dorywcza, S3-praca okresowa przerywana, S4-praca okresowa przerywana z rozruchem, S5-praca okresowa przerywana hamowaniem elektrycznym, S6-praca okresowa długotrwała z przerwami jałowymi, S7-praca okresowa długotrwała z hamowaniem elektrycznym, S8- praca okresowa długotrwała ze zmianami prędkości obrotowej, S9-praca z nieokresowymi zmianami obciążenia i prędkości obrotowej. Pod względem chłodzenia mamy maszyny o chłodzeniu: naturalnym, wymuszonym własnym (na osi wirnika znajduje się wentylator powodujący wymuszony przepływ powietrza przez kanały maszyny), obcym zewnętrznym (środkiem chłodzącym może być woda, powietrze i inne).

W zależności od stopnia ochrony części będących pod napięciem i części wirujących przed dostępem wody, przed dotknięciem i przed dostaniem się obcych ciał stałych do wnętrza, jak też w zależności od sposobu wprowadzania w ruch i od dróg przepływu czynnika chłodzącego (np. powietrza) rozróżnia się następujące rodzaje budowy maszyn elektrycznych:

- budowa otwarta (symbol A), bez żadnej ochrony,
- budowa chroniona (B), części będące pod napięciem oraz części wirujące są chronione przed wodą spadającą pionowo, przed dotknięciem ręki oraz przed przedostawaniem się prętów o średnicy mniejszej niż 15 mm,
- budowa okapturzona (C), ochrona przed wodą tryskającą poziomo, inne parametry jak w budowie typu B,
- budowa zamknięta (Z), brak otworów otwartych,
- budowa głębinowa (G), jak typ Z lecz wodoszczelna.

Silniki indukcyjne trójfazowe

Silniki indukcyjne należą do grupy silników asynchronicznych, najczęściej stosowanych, najprostszych w budowie i najbardziej niezawodnych. Silnik indukcyjny (rys. 63a) ma stojan uzwojony trójfazowo oraz wirnik. Stojan składa się z pakietu blach magnetycznych. Na wewnętrznym obwodzie stojana są wycięte żłobki, w których są ułożone uzwojenia



Rys. 63. Budowa silnika indukcyjnego: a) stojan, b) uzwojenie wirnika klatkowego, c) wirnik silnika pierścieniowego, 1 – korpus wirnika, 2 – uzwojenie, 3 – wał, 4 – pierścień ślizgowy połączone z końcami uzwojeń wirnika [opracowanie własne]

trójfazowe. Końcówki uzwojeń są wyprowadzone na tabliczkę zaciskową i oznaczone literami *UVW* z cyfrą 1 (początki) i 2 (końce). Uzwojenia te łączy się w gwiazdę lub w trójkąt. Wirnik jest złożony także z blach magnetycznych z naciętymi żłobkami dla ułożenia uzwojeń. W zależności od rodzaju uzwojeń wirnika rozróżnia się:

- silniki pierścieniowe, w których wirnik jest uzwojony trójfazowo, podobnie jak stojan. Końcówki uzwojeń wirnika połączonych w gwiazdę, są wyprowadzone na zewnątrz poprzez pierścienie i szczotki (rys. 63b),
- silniki zwarte (klatkowe), których wirnik ma uzwojenie w postaci prętów o zwartych końcach. Uzwojenie tworzy rodzaj klatki (rys. 63b).

Każdy silnik powinien mieć tabliczkę znamionową (rys. 64), umocowaną na stałe w miejscu umożliwiającym łatwe odczytanie zawartych na niej informacji a napisy na niej powinny być wykonane w sposób trwały. Dane jakie powinny być na niej zawarte zostały podane na wstępie tego punktu. Podstawowe parametry silników to:

Moc znamionowa silnika P_N jest to moc mechaniczna oddawana przez silnik.

$$P_N = P_{in} \eta$$

Wzór na moc silnika ma postać

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \eta$$

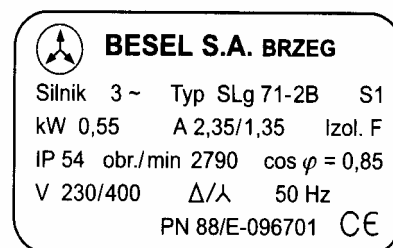
η – sprawność silnika wynikająca z danych umieszczonych na tabliczce

Napięcie znamionowe U_N silnika jest to wartość skuteczna napięcia przemiennego międzyprzewodowego.

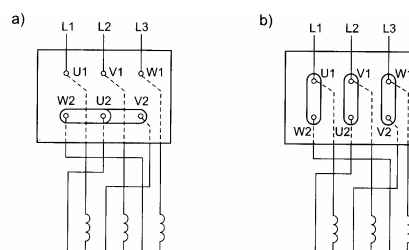
Prąd znamionowy I_N to taki prąd, który płynąc przez uzwojenia silnika nie powoduje ich nagrzania powyżej temperatury dopuszczalnej.

Znajomość znamionowych parametrów silnika jest niezbędna do prawidłowego doboru i eksploatacji silnika. Ważną częścią silnika jest tabliczka zaciskowa (rys. 64). Zawiera ona zaciski, za pomocą których łączy się uzwojenia silnika z instalacją zasilającą. Silniki indukcyjne trójfazowe mają na tabliczce zaciskowej sześć zacisków, do których przyłączone są początki i końce uzwojeń stojana. Początki uzwojeń oznaczane są *U1*, *V1*, *W1* zaś końce odpowiednie *U2*, *V2*, *W2*. Dzięki odpowiedniemu ułożeniu zacisków można łatwo połączyć uzwojenia silnika w trójkąt lub gwiazdę. Na tabliczce znamionowej silnika podawane są dwie wartości napięcia znamionowego, przeważnie 230/400 V (rys. 64). Należy pamiętać, że połączenia uzwojenia stojana w trójkąt jest możliwe wtedy, gdy wartość międzyfazowego napięcia sieci odpowiada mniejszej wartości napięcia podanej na tabliczce znamionowej. Dla napięć jak wyżej możliwe jest połączenie uzwojeń tylko w gwiazdę. Mniejsza wartość napięcia podawanego na tabliczce znamionowej odpowiada znamionowemu napięciu fazy silnika.

Silniki indukcyjne klatkowe stanowią ponad 90% wszystkich eksploatowanych w przemyśle silników. Zalety silników klatkowych: prosta konstrukcja, niezawodne działanie, niskie koszty produkcji i eksploatacji, niewielka zmienność prędkości obrotowej przy zmianach obciążenia (w całym dopuszczalnym zakresie), duża przeciążalność, prosty i łatwy do automatyzacji rozruch. Wadami silników klatkowych są: duży prąd rozruchowy, mały współczynnik mocy i mała sprawność przy małym obciążeniu, duży wpływ odchylenia



Rys. 64. Tabliczka znamionowa silnika [opracowanie własne]



Rys. 65. Połączenie uzwojeń stojana na tabliczce zaciskowej:
a) w gwiazdę, b) w trójkąt [opracowanie własne]

napięcia od wartości znamionowej na moment obrotowy silnika, trudna regulacja prędkości obrotowej.

Oprócz opisanych silników indukcyjnych trójfazowych, spotykane są również silniki indukcyjne jednofazowe i silniki komutatorowe prądu przemiennego. Są to głównie silniki małej mocy, stosowane np. w gospodarstwach domowych. Głównym problemem w pracy silników indukcyjnych jednofazowych jest wytworzenie pola magnetycznego wirującego. Stosuje się różne sposoby pokonania tej trudności. Silniki indukcyjne jednofazowe są budowane z pomocniczym uzwojeniem rozruchowym, włączanym na czas rozruchu. Parametry tego uzwojenia (impedancję i jej charakter) dobiera się tak, aby w czasie rozruchu powstało przesunięcie fazowe między prądami w uzwojeniu rozruchowym i głównym. Silniki komutatorowe prądu przemiennego to silniki o budowie podobnej do budowy silników prądu stałego (silników szeregowych). Silniki indukcyjne jednofazowe są stosowane w pralkach, lodówkach, wirówkach itp. Silniki komutatorowe prądu przemiennego są stosowane w układach automatyki oraz niewielkich wentylatorów, mikserów, wiertarek ręcznych, odkurzaczy i innych odbiorników wymagających dużej prędkości obrotowej lub jej regulacji.

Zabezpieczenia silników elektrycznych

W pracy silników elektrycznych mogą wystąpić różnego rodzaju zakłócenia, które mogą doprowadzić do zniszczenia silnika. Należą do nich:

- zwarcia międzyfazowe w uzwojeniach i doprowadzeniach, zwarcia międzyzwojowe,
- przeciążenie,
- zanik napięcia w fazie,
- obniżenie napięcia,
- asymetria napięć między fazami.

Zabezpieczenia przed zwarciami międzyfazowymi silnika realizuje się przez zastosowanie wyłączników nadmiarowoprądowych o charakterystyce C (dla silników małej mocy) lub D (dla silników dużej mocy o rozruchu ciężkim).

Zabezpieczenia przeciążeniowe są potrzebne, gdy wzrasta wartość prądu zasilającego silnik ponad wartość znamionową. Przyczynami przeciążenia mogą być: zanik lub obniżenie napięcia, nadmierne obciążenie silnika przez urządzenie napędzane. Przedłużający się przepływ prądu większego niż znamionowy grozi uszkodzeniem silnika oraz instalacji. Zabezpieczenie przeciążeniowe może być zrealizowane według jednej z następujących zasad:

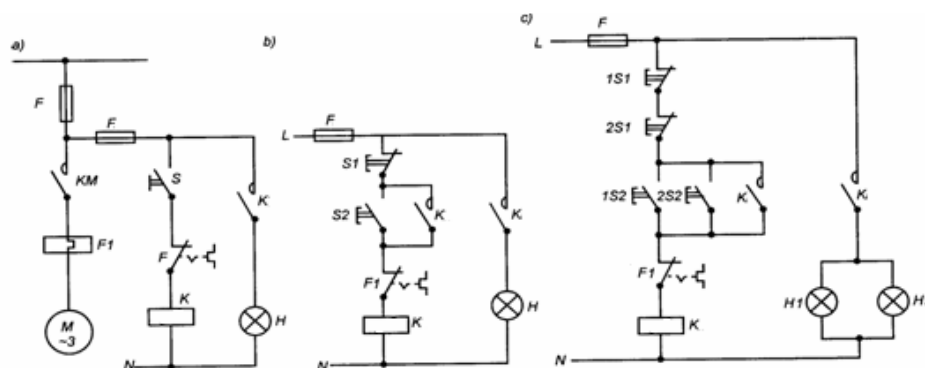
1. Zabezpieczenie reaguje na wartość prądu pobieranego przez zabezpieczane urządzenie i zadziała, jeśli prąd przekroczy wartość dopuszczalną, a czas działania jest tym mniejszy, im większy jest prąd przeciążeniowy. Tak działają włączone w obwód silnika przekaźniki i wyzwalacze termobimetalowe oraz przekaźniki nadprądowe elektroniczne. Wyzwalacz lub przekaźnik termobimetalowy realizuje zabezpieczenie przeciążeniowe według pierwszej zasady, przy czym:
 - wyzwalacz powoduje otwarcie łącznika na drodze mechanicznej, bezpośrednio uwalniając zapadkę zamka, a więc może być stosowany tylko w łącznikach, które w stanie zamkniętym są utrzymywane przez zamek (wyłączniki),
 - przekaźnik powoduje otwarcie łącznika na drodze elektrycznej, za pośrednictwem swego zestyku włączonego w obwód sterowniczy łącznika (stycznika, wyłącznika).
2. Zabezpieczenie reaguje na temperaturę zabezpieczanego urządzenia i interweniuje bezzwłocznie, jeśli ta temperatura przekroczy wartość dopuszczalną. Tak działają zabezpieczenia z czujnikami temperaturowymi umieszczonymi we wnętrzu silnika.
3. Zabezpieczenia przed zanikiem fazy, asymetrią napięć między fazami realizuje się poprzez zastosowanie czujników zaniku fazy, czujników kolejności i zaniku fazy. Czujnik powoduje otwarcie łącznika na drodze elektrycznej, za pośrednictwem swego zestyku włączonego w obwód sterowniczy łącznika (stycznika, wyłącznika).

Układy sterowania silnika elektrycznego

W układach sterowania silnikami wykorzystuje się powszechnie urządzenia zwane stycznikami. Budowa i zasada działania stycznika jest opisana w rozdziale „Instalacje elektryczne”. Użycie styczników do sterowania silnikami podyktowane jest tym, że styczniki:

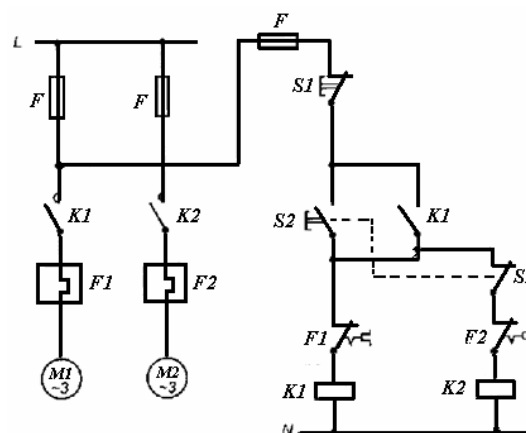
- mogą być zamykane i otwierane zdalnie. Przyciski i inne łączniki wykorzystywane do sterowania można umieszczać w dowolnym miejscu, niekoniecznie przy stycznikach,
- charakteryzują się dużą częstością łążeń (kilkaset łążeń do kilku tysięcy na godzinę),
- mają dużą trwałość mechaniczną (zużywają się mechanicznie po wykonaniu kilku milionów operacji zamykania i otwierania),
- stanowią pod napięciowe zabezpieczenie.

Na rys. 66 pokazano przykłady stycznikowego sterowania silnikami indukcyjnymi trójfazowymi.



Rys. 66. Przykłady sterowania stycznikowego silnikami: a) za pomocą łącznika stabilnego, b) za pomocą przycisków sterujących zwrotnych, c) sterowanie przyciskami z dwóch miejsc; F – bezpieczniki, F1 – przekaźnik termiczny, K – stycznik, S – łącznik bistabilny, S1, S2 – przyciski sterownicze, H – lampki sygnalizacyjne [opracowanie własne]

Rysunek 66a pokazuje układ sterowania za pomocą łącznika bistabilnego, a na rys. 66b, c sterowanie przyciskami zwrotnymi z jednego i z dwóch miejsc. Uruchomienie silnika następuje przez ustawienie łącznika S w pozycję „ZAL” (rys. 66a) albo przez naciśnięcie przycisku S2 (rys. 66b, c) lub 1S2 albo 2S2 (rys. 66c) zostaje podane napięcie na cewkę stycznika K, powodując jego zadziałanie. Następuje zamknięcie styków zwiernych K głównych, podających napięcie na silnik, przez co nastąpi uruchomienie silnika M, i pomocniczych, załączających lampki sygnalizacyjne H (rys. 66a, b, c) oraz dających tzw. samopodtrzymanie stycznika, aby po zwolnieniu nacisku na przycisk sterujący S2 stycznik pracował dalej. Zatrzymanie silnika następuje po ustawieniu łącznika S (rys. 66a) w pozycję „WYL” lub przez naciśnięcie przycisku zwrotnego S1 (rys. 66b,c) co powoduje przerwanie obwodu cewki stycznika K a w konsekwencji jego zwolnienie. Otwierają się styki powodując zabranie napięcia z silnika a w związku z tym jego zatrzymanie oraz wyłączenie sygnalizacji optycznej (gasną żarówki H). Zatrzymanie silnika nastąpi automatycznie po zadziałaniu przekaźnika termicznego F1 (który zadziała po



Rys. 67. Przykład sterowania dwóch silników [opracowanie własne]

wzroście prądu pobieranego przez silnik do wartości $I = 1,1 I_n$, gdzie I_n to prąd znamionowy silnika). Po zadziałaniu przekaźnika termicznego jego styk rozwierny $F1$ przerywa obwód cewki stycznika K , powodując jego zwolnienie i zatrzymanie silnika.

Na rys. 67 pokazano układ sterowania dwoma silnikami. Działanie układu jest następujące. Naciśnięciu przycisku $S2$ powoduje utworzenie obwodu dla cewki stycznika $K1$ i jednocześnie przerwanie obwodu dla cewki stycznika $K2$. Stycznik $K1$ działa, zapewnia sobie podtrzymanie swoim zestykiem pomocniczym zwiernym $K1$ i powoduje uruchomienie silnika $M1$. Po zwolnieniu przycisku $S2$ powstaje obwód dla stycznika $K2$, który zadziała powodując uruchomienie silnika $M2$. Zatrzymanie silników nastąpi po naciśnięciu przycisku $S1$ lub po zadziałaniu zabezpieczenia termicznego silnika $M1$. Po zadziałaniu zabezpieczenia termicznego silnika $M2$, nastąpi trwałe przerwanie obwodu działania cewki stycznika $K2$. Stycznik $K2$ zwalnia powodując zatrzymanie silnika $M2$.

4.9.2. Pytania sprawdzające

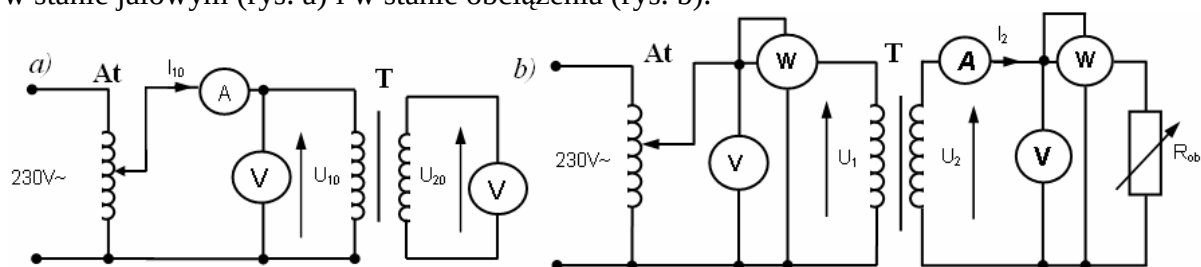
Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jak można wyjaśnić pojęcie maszyna elektryczna?
2. Co określa termin transformator?
3. Jakie znasz parametry transformatora?
4. Jak działa transformator?
5. Jakie znasz stany pracy transformatora?
6. Jak zbudowany jest silnik indukcyjny?
7. Co to jest silnik klatkowy?
8. Co to jest silnik pierścieniowy?
9. Co to jest tabliczka znamionowa maszyny elektrycznej?
10. Do czego służy tabliczka zaciskowa silnika?
11. Jakie znasz zabezpieczenia silnika?
12. Jakie urządzenia wchodzi w skład układów sterowania silnikami indukcyjnymi?

4.9.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Wyznacz podstawowe parametry oraz charakterystyki transformatora jednofazowego w stanie jałowym (rys. a) i w stanie obciążenia (rys. b).



Rysunek do ćwiczenia 1

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) połączyć układ pomiarowy wg rys. a,
- 2) zmieniając wartość napięcia zasilającego autotransformatorem wykonać pomiary U_{10} po stronie pierwotnej i U_{20} po stronie wtórnej transformatora dla wartości $U_{10} = 20, 40, \dots, 240 \text{ V}$,

- 3) wyniki pomiarów zapisać w tabeli nr 1,

Tabela 1 do ćwiczenia 1

U_{10}	U_{20}	δ	δ_{sr}
V	V	V/V	V/V
			

- 4) obliczyć przekładnię napięciową dla każdego pomiaru a następnie jej wartość średnią,
- 5) spisać dane znamionowe transformatora,
- 6) porównać wartości wielkości znamionowych z wartościami wyznaczonymi z pomiarów,
- 7) połączyć układ pomiarowy wg rys. b,
- 8) podać od strony pierwotnej napięcie równe napięciu znamionowemu i nie zmieniać jego wartości podczas pomiarów,
- 9) zmieniając wartość rezystancji rezystora obciążenia R_{obc} (od wartości maksymalnej do takiej przy której popłynie w uzwojeniu wtórnym prąd znamionowy I_{2n}) wykonać pomiary prądu I_2 , napięcia U_2 oraz mocy czynnych P_1 i P_2 ,
- 10) wyniki pomiarów zapisać w tabeli nr 2,

Tabela 2 do ćwiczenia 1

I_2	U_2	P_1	P_2	η
A	V	W	W	%

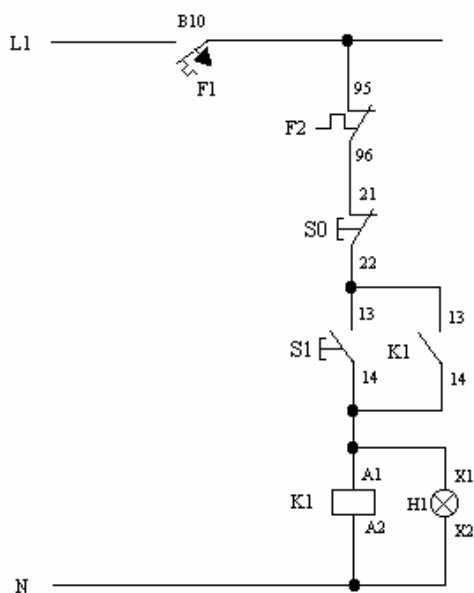
- 11) narysować i omówić charakterystyki: $U_2 = f(I_2)$, $\eta = f(I_2)$,
- 12) na podstawie wyników pomiarów i obliczeń określić znamionową wartość sprawności transformatora η_n .

Wypożyczenie stanowiska pracy:

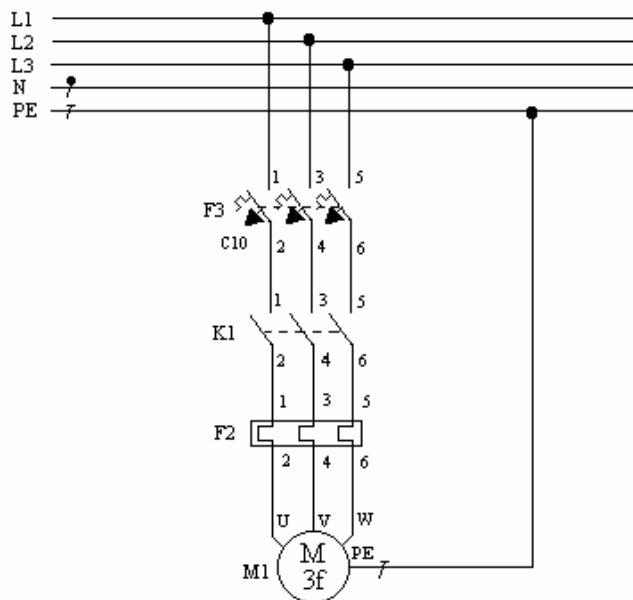
- badany transformator T,
- autotransformator,
- amperomierze i woltomierze elektromagnetyczne, watomierz elektrodynamiczny,
- przewody łączeniowe,
- kalkulator, papier milimetrowy, przybory do rysowania,
- poradnik dla ucznia,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotycząca transformatorów,
- papier milimetrowy, flamastry.

Ćwiczenie 2

Wykonaj i uruchom układ sterowania silnika indukcyjnego zgodnie ze schematem ideowym (rysunek nr 1) i schematem sterowania stycznikowego (rysunek nr 2). Po sprawdzeniu prawidłowości połączeń elektrycznych, podłącz napięcie zasilania i sprawdź prawidłowość działania układu.



Rysunek 1 do ćwiczenia 2



Rysunek 2 do ćwiczenia 2

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) przeanalizuj dokładnie treść zadania oraz załączone schematy – ideowy układu sterowania stycznikowego silnika (rys. 1) i schemat ideowy układu silnika indukcyjnego (rys. 2),
- 2) połącz układ zgodnie z rysunkiem 1 do ćwiczenia 2,
- 3) sprawdź zgodność wykonanych połączeń ze schematem ideowym układu z rys. 1,
- 4) podłącz napięcie zasilania i uruchom układ z rys. 1,
- 5) połącz układ zgodnie z rysunkiem 2 do ćwiczenia 2,
- 6) sprawdź zgodność wykonanych połączeń ze schematem ideowym układu z rys. 2,
- 7) podłącz napięcie zasilania i uruchom układ sterowania silnika indukcyjnego.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- wyłączniki instalacyjne B10 i C10,
- przekaźnik termiczny,
- stycznik,
- przyciski sterujące: jeden zwierny, jeden rozwierny,
- silnik indukcyjny trójfazowy,
- lampka sygnalizacyjna,
- przewody do wykonania połączeń,
- miernik uniwersalny,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczące stycznikowych układów sterowania.

4.9.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyjaśnić pojęcie maszyna elektryczna?	☐	☐
2) wyjaśnić termin transformator?	☐	☐
3) scharakteryzować parametry transformatora?	☐	☐
4) scharakteryzować stany pracy transformatora?	☐	☐
5) porównać silnik indukcyjny klatkowy i pierścieniowy?	☐	☐
6) wyjaśnić znaczenie informacji zawartych w tabliczce znamionowej silnika?	☐	☐
7) połączyć uzwojenia silnika w gwiazdę i trójkąt?	☐	☐
8) dokonać pomiarów parametrów transformatora?	☐	☐
9) wykonać i uruchomić układ sterowania silnikiem indukcyjnym?	☐	☐
10) obliczyć sprawność silnika z jego danych znamionowych?	☐	☐

4.10. Instalacje elektryczne

4.10.1. Materiał nauczania

Instalacjami elektrycznymi nazywamy tę część urządzeń elektroenergetycznych niskiego napięcia, która służy do połączeń urządzeń odbiorczych z rozdzielczą siecią elektroenergetyczną bezpośrednio, lub za pośrednictwem stacji transformatorowo-rozdzielczych. Instalacje elektryczne w zależności od charakteru odbiorników dzieli się na oświetleniowe i siłowe. Do instalacji oświetleniowych zalicza się urządzenia zasilające źródła światła oraz instalacje urządzeń grzejnych (małej mocy) w budynkach mieszkalnych. Do instalacji siłowych zalicza się urządzenia zasilające silniki elektryczne, przemysłowe urządzenia grzejne oraz urządzenia do ogrzewania pomieszczeń. W zależności od miejsca przeznaczenia instalacje można podzielić na:

- instalacje w budynkach nieprzemysłowych, takich jak: mieszkalne, szkolne, biurowe, szpitalne,
- instalacje przemysłowe, w budynkach takich jak: hale fabryczne, hodowlane obiekty rolnicze, obiekty górnicze,
- instalacje tymczasowe, których czas użytkowania nie przekracza 6 miesięcy, w budynkach i pomieszczeniach eksploatowanych, zaś 3 lat na budowach wznoszonych.

W zależności od warunków pracy urządzeń elektrycznych rozróżnia się instalacje w pomieszczeniach:

- suchych ogrzewanych lub nagrzewanych (mieszkania, biura),
- przejściowo wilgotnych (łazienki, kuchnie, piwnice),
- wilgotnych (lodownie, chłodnie, kuchnie zbiorowego żywienia),
- bardzo wilgotnych (kabiny kąpielowe, browary, gorzelnie),
- z wyziewami żrącymi (akumulatornie, farbiarnie, stajnie, obory),
- gorących (oranżerie, łaźnie, prasownie bielizny),
- niebezpiecznych pod względem wybuchowym (składy benzyny, rafinerie nafty, fabryki).

Instalacje elektryczne powinny spełniać wymagania:

- niezawodności zasilania odbiorników energii elektrycznej,
- bezpieczeństwa obsługi, użytkowników oraz osób postronnych,
- dobrych warunków pracy osób obsługujących i użytkujących,
- optymalnych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

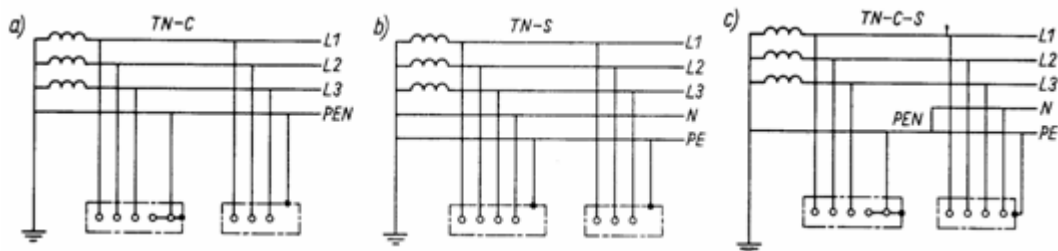
Instalacje elektryczne składają się z następujących części:

- przyłącza: jest to urządzenie elektryczne, które łączy linię zasilającą z urządzeniem odbiorczym bezpośrednio lub poprzez wewnętrzną linię zasilającą (włz),
- wewnętrznej linii zasilającej – włz łączy linię zasilającą z urządzeniami odbiorczymi,
- urządzeń odbiorczych, do których zaliczamy: przewody elektryczne, łączniki służące do załączania wyłączania obwodów, zabezpieczenia.

Układy sieci zasilającej

Układy sieci pokazane na rys. 68 mają oznaczenia literowe (tab. 2), przy czym:

- pierwsza litera (T lub I) oznacza związek między układem sieci a ziemią,
- druga litera (N lub T) oznacza sposób połączenia z ziemią części przewodzących urządzeń, nie pozostających w normalnych warunkach pracy pod napięciem,
- trzecia i czwarta litera (C lub/ oraz S) określają, czy układ ma wspólny przewód ochronnoneutralny PEN czy przewody neutralny (N) i ochronny (PE) są rozdzielone (S).



Rys. 68. Układy sieci niskiego napięcia: a) sieć typu TN-C, b) sieć typu TN-S, c) sieć typu TN-C-S [opracowanie własne]

Poszczególne litery są skrótami od wyrażen:

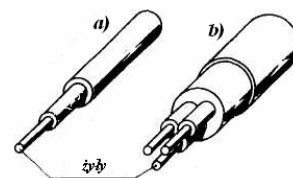
T - *terre* (franc.) – ziemia; N - *neutral* (ang.) – neutralny; I - *isolate* (ang.) – izolować; C - *combine* (ang.) - łączyć, wiązać, S - *separate* (ang.) - rozdzielać, oddzielać.

Najbardziej rozpowszechnionym układem sieci oraz instalacji komunalnych i przemysłowych jest układ TN o napięciu znamionowym 230/400 V.

W sieciach i instalacjach stosuje się przewody o różnym przeznaczeniu. Sposób oznaczania poszczególnych przewodów na schematach i planach elektrycznych powinien być jednoznaczny i zrozumiały dla projektantów i wykonawców instalacji, a różna barwa izolacji lub numeracja poszczególnych żył przewodów wielożyłowych powinna ułatwiać bezbłędny montaż. Przewody ochronne PE oraz ochronno-neutralne PEN muszą być dwubarwne, zielono-żółte, przy czym stosunek powierzchni poszczególnych barw jest nie mniejszy niż 30:70%. Przewody neutralne N oraz środkowe M (w instalacjach prądu stałego) powinny mieć barwę jasnoniebieską. W przewodach wielożyłowych żadna z żył nie może mieć barwy izolacji żółtej ani zielonej. Przewody fazowe L i neutralne N w instalacjach wykonanych przewodami jednożyłowymi pod osłoną mogą mieć barwę dowolną, z wyjątkiem żółtej lub zielonej ani też nie mogą być wielobarwne. Przewody fazowe nie powinny mieć barwy jasnoniebieskiej, zarezerwowanej dla przewodu neutralnego N.

Przewody instalacji elektrycznej

Do wykonywania instalacji elektrycznych używa się przewodów izolowanych. Przewód jednożyłowy (rys. 69a) zawiera żyłę metalową, przeznaczoną do przewodzenia prądu, oraz izolację, która pełni rolę izolacji roboczej, dlatego przewody mogą stykać się ze sobą i z przedmiotami metalowymi nie powodując zwarcia. Spełnia też rolę izolacji podstawowej: chroni przed porażeniem prądem elektrycznym. Na izolację mogą być nałożone warstwy ochronne, zabezpieczające przewód przed działaniem wilgoci, substancji chemicznych i innych szkodliwych czynników. Jeżeli połączy się więcej izolowanych żył i pokryje warstwami ochronnymi, otrzymuje się przewód wielożyłowy (rys. 69 b): dwu-, trój-, cztero- lub pięciożyłowy. Przewody wielożyłowe mogą być układane bez osłon i zajmują mniej miejsca niż równoważna liczba przewodów jednożyłowych w rurce instalacyjnej. Żyły przewodów instalacyjnych wykonywane są z miedzi i aluminium. Przewody miedziane są lepsze, chociaż droższe.



Rys. 69. Przewody:
a) jednożyłowy,
b) wielożyłowy
(trójżyłowy)
[opracowanie własne]

Przekroje przewodów są znormalizowane i są następujące: 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 185; 240; 300; 400; 500; 625; 800; 1000 mm². Przewody do układania na stałe nie muszą być giętkie i mają żyły je drutowe przy przekroju do 10 mm², a żyły wielodrutowe (linki) przy większym przekroju. Natomiast przewody do odbiorników ruchomych powinny być giętkie i wytrzymywać wielokrotne przeginięcie; niezależnie od przekroju mają żyły wielodrutowe, skręcone z cienkich drutów miedzianych. Izolację przewodów instalacyjnych wykonuje się głównie z polwinitu (PVC). Na izolację mogą być

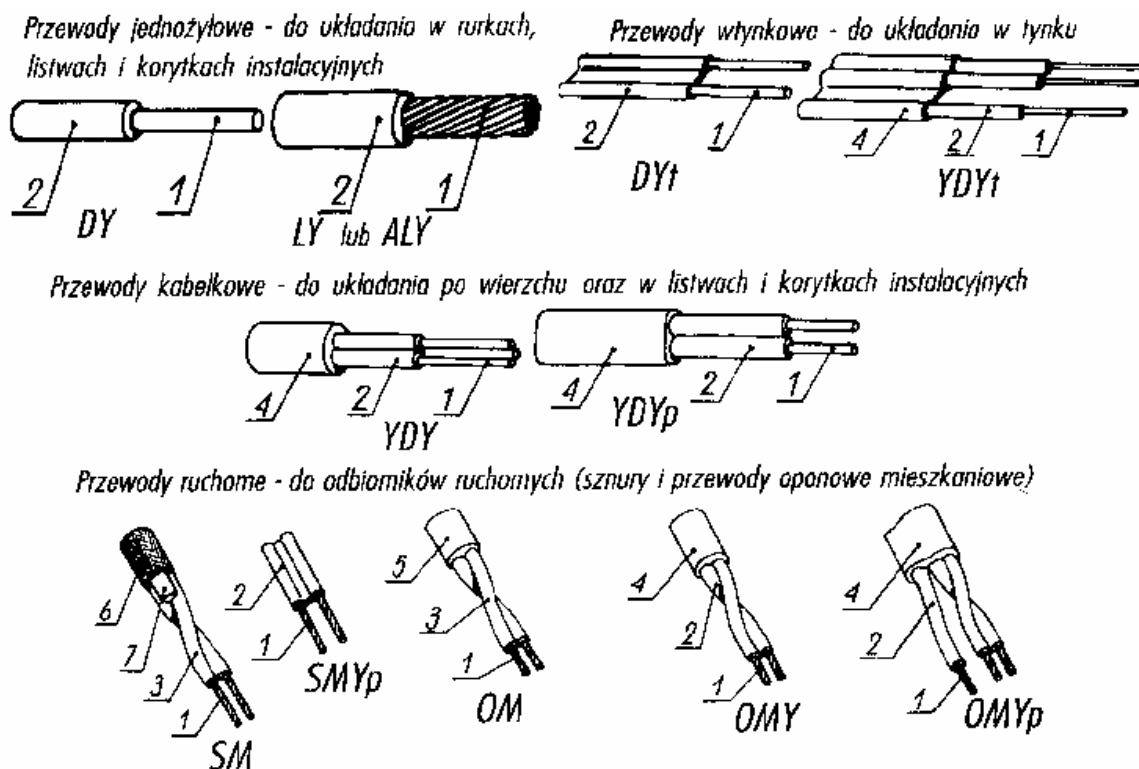
nakładane są warstwy ochronne takie jak: powłoka – szczelna warstwa zapobiegająca wnikaniu wilgoci do wnętrza przewodu; pancerz – wykonany przez owinięcie metalowymi taśmami lub drutami w celu ochrony przewodu od uszkodzeń mechanicznych; opłot z materiału włóknistego na izolacji albo na pancerzu, dla ochrony od czynników atmosferycznych. Każdy typ przewodu ma swój symbol jednoznacznie określający jego budowę. Poniżej zamieszczono oznaczenia przewodów

A żyła aluminiowa lub juta	a – powłoka odporna na wpływy atmosferyczne i chemiczne
D drut	d – o wzmocnionej izolacji polwinitowej
F linka stalowa	dz – przewód dzwinkowy
G izolacja gumowa	g – przewód giętki
K przewód kabelkowy lub kabel	l – przewód typu lekkiego
L linka	m – przewód montażowy
O opona gumowa lub polwinitowa	o – przewód okrągły
P przewód płaszczowy	p – przewód płaski
S przewód sznurowy	t – taśma stalowa
W przewód warsztatowy	u – przewód uzbrojony
Y polwinit	w – przewód na wysokie napięcie

Przykłady oznaczeń przewodów:

YKY – przewód kabelkowy w powłoce polwinitowej z żyłami miedzianymi w izolacji polwinitowej;

DYt (ADYt) – drut miedziany (aluminiowy) w izolacji polwinitowej, w powłoce polwinitowej. Przykłady przewodów izolowanych pokazano na rys. 70.

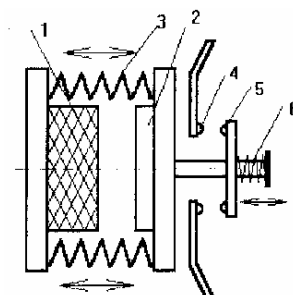


Rys. 70. Przykłady przewodów instalacji elektrycznej: 1 – żyła, 2 – izolacja polwinitowa, 3 – izolacja gumowa, 4 – powłoka (opona) polwinitowa, 5 – opona gumowa, 6 – opłot włóknisty, 7 – wypełniacz włóknisty [opracowanie własne]

Łączniki są przeznaczone do przerywania, zamykania, przełączania obwodów.

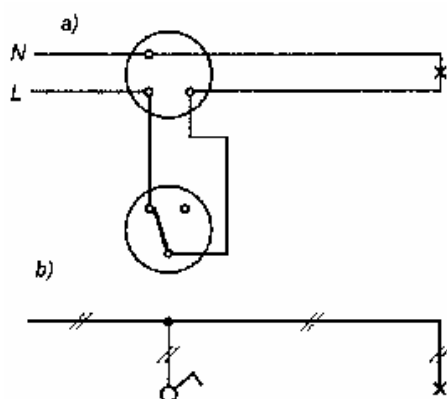
Łączniki izolacyjne – przeznaczone do tworzenia przerw izolacyjnych dla zapewnienia bezpieczeństwa ludzi i urządzeń.

Łączniki manewrowe – styczniki – budowa stycznika pokazana jest na rys. 70. Podstawowe części stycznika to: 1 – elektromagnes, 2 – zwora ruchoma, 3 – sprężyny zwrotne, 4 – styki główne prądowe, nieruchome, 5 – styki główne prądowe, ruchome, 6 – sprężyna dociskowa, stykowa. Stycznik jest rozłącznikiem manewrowym, o napędzie elektromagnetycznym. Po doprowadzeniu napięcia do cewki stycznika (rys. 71) elektromagnes 1 przyciąga zworę 2 ze stykami ruchomymi 5, ugina sprężyny zwrotne 3, a w ostatniej fazie ruchu zwory ugina sprężyny stykowe 6. Następuje zamknięcie styków głównych prądowych, otwarcie (zamknięcie) styków pomocniczych. Stycznik jest w położeniu aktywnym. Po odłączeniu napięcia od cewki stycznika stycznik zwalnia, pod wpływem sprężyn zwrotnych styki wracają do położenia wyjściowego (zwierne zostają rozwarte, rozwierne zamknięte). Aby stycznik działał poprawnie, napięcie na zaciskach cewki stycznika powinno wynosić $0,85 \div 1,1$ napięcia znamionowego ($196 \div 253$ V). Układy sterowania stycznika pokazano w rozdziale 4.9.

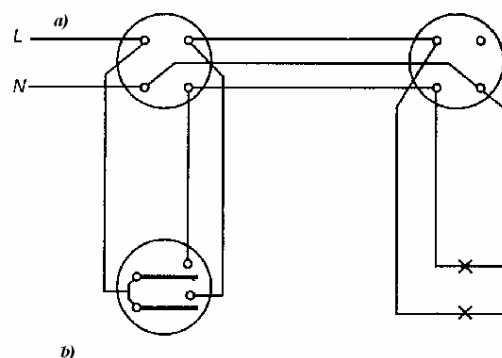


Rys. 71. Budowa stycznika
[opracowanie własne]

Łączniki instalacyjne umożliwiają czynności łączeniowe w obwodach elektrycznych. Używane są do załączania i wyłączania lamp oraz innych odbiorników. Są to przeważnie łączniki klawiszowe jednobiegunowe, dwubiegunowe, świecznikowe, schodowe, krzyżowe i wiele innych. Zasadę ich działania pokazano na rys. 72 i rys. 73.



Rys. 72. Sterowanie punktem świetlnym za pomocą łącznika jednobiegunowego:
a) schemat wieloliniowy, b) schemat jednoliniowy
[opracowanie własne]



Rys. 73. Sterowanie punktem świetlnym za pomocą łącznika świecznikowego:
a) schemat wieloliniowy, b) schemat jednoliniowy
[opracowanie własne]

Wyłączniki instalacyjne nadprądowe są nowoczesną generacją wyłączników nadprądowych płaskich, przeznaczonych do zabezpieczenia instalacji elektrycznych przemysłowych, domowych i podobnych (np. budownictwo ogólne, maszyny, urządzenia, itp.). Wyłączniki mają za zadanie ochronę instalacji przed skutkami przeciążeń i zwarć eliminując szkodliwe działania prądów przeciążeniowych. Mogą być stosowane przy zasilaniu jedno- i trójfazowym w dowolnych systemach elektroenergetycznych. Zalety wyłączników:

- pełny zakres najnowszych charakterystyk czasowo-prądowych B, C i D,
- szeroki asortyment zakresów prądowych 0,3 ... 63 A,
- wyższe napięcia znamionowe 240/415 VAC,

- duża trwałość mechaniczna i łączeniowa,
 - bistabilny zatrask ułatwiający montaż i demontaż wyłączników na wspornikach montażowych,
 - szeroki asortyment zakresów prądowych i ich charakterystyk działania wyzwalaczy umożliwia prawidłową realizację zabezpieczenia instalacji i odbiorników.
- Wyłączniki instalacyjne zbudowane są z następujących zespołów i elementów:
- wyzwalaczy termobimetalowych (przeciążeniowych),
 - wyzwalaczy elektromagnetycznych (zwarciovych),
 - mechanizm zamka z układem stykowym,
 - układu gaszeniowego.

Charakterystyka B (w zakresach prądowych od 6 do 63A). Granica zadziałania wyzwalaczy termobimetalowych zawiera się od 1,13 do 1,45 krotności prądu znamionowego wyłączników (temp. odniesienia 30°C). Obszar działania wyzwalaczy elektromagnetycznych wynosi od 3 do 5 krotności prądu znamionowego. Wyłączniki nadprądowe o charakterystyce B są przeznaczone do zabezpieczania przewodów i odbiorników w obwodach oświetlania gniazd wtykowych i sterowania.

Charakterystyka C (w zakresach prądowych od 0,3 do 63A). Granica zadziałania wyzwalaczy termobimetalowych zawiera się od 1,13 do 1,45 krotności prądu znamionowego wyłączników (temperatura odniesienia 30°C). Obszar zadziałania o charakterystyce działania wyzwalaczy C wynosi od 5 do 10 krotności prądu znamionowego. Przeznaczone są do zabezpieczenia przed skutkami zwarć i przeciążeń instalacji, w których zastosowano urządzenia elektroenergetyczne o dużych prądach rozruchowych (silniki, transformatory).

Charakterystyka D (w zakresach prądowych od 0,3 do 63A). Granica zadziałania wyzwalaczy termobimetalowych zawiera się od 1,13 do 1,45 krotności prądu znamionowego wyłączników (temperatura odniesienia 30°C). Obszar zadziałania wyzwalaczy elektromagnetycznych wynosi od 10 do 20 krotności prądu znamionowego. Wyłączniki nadprądowe o charakterystyce D gwarantują, że urządzenie elektroenergetyczne o bardzo dużych prądach w chwili załączenia, jak silniki o ciężkim rozruchu, transformatory, grupy lamp oświetleniowych nie doprowadzają do niepożądanych przedwczesnych wyłączeń zasilania zabezpieczanej instalacji.

Wyłączniki różnicowoprądowe

Zasada działania wyłącznika różnicowoprądowego polega na kontroli sumy geometrycznej prądów wpływających i wypływających z odbiornika. Można przyjąć, że w warunkach poprawnej pracy każdego urządzenia suma geometryczna prądów w przewodach zasilających urządzenie powinna wynosić zero czyli taka sama wartość wpływa i wypływa z urządzenia. Jeżeli w urządzeniu nastąpi upływ prądu, tym samym bilans prądów w wyłączniku nie wyniesie zero i wyłącznik zadziała. Wyłączniki różnicowoprądowe są budowane na różne wartości prądów różnicowych:

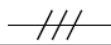
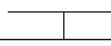
- wyłączniki wysokoczułe - $I_{Dn} = 10 \text{ mA}, 30 \text{ mA}$ przeciwporażeniowe zabezpieczenie instalacji,
- wyłączniki niskoczułe - $I_{Dn} = 300 \div 1000 \text{ mA}$, przeciwpożarowe (zabezpieczenie przed prądami ziemnymi stwarzającymi niebezpieczeństwo pożaru).

Poprawnie działający wyłącznik różnicowy może zadziałać wtedy, gdy prąd upływowy (różnicowy) przekroczy 15 mA (w przypadku wyłączników wysokoczułych o znamionowym prądzie różnicowym 30 mA), jednakże zadziałanie może nastąpić w dowolnie długim czasie. Przy przekroczeniu prądu 30 mA poprawnie działający wyłącznik powinien zadziałać w czasie nie większym niż 0,2 s.

Puszki – służą do mocowania w nich łączników i gniazd wtykowych oraz wykonywania w nich połączeń z przewodami instalacyjnymi.

Schemat instalacji obejmuje współpracujące ze sobą urządzenia elektryczne i ich połączenia. Za pomocą odpowiednich symboli graficznych przedstawia się wyposażenie poszczególnych rozdzielnic w urządzenia zabezpieczające przed skutkami przetężeń, przepięć i porażeń prądem elektrycznym, łączniki tablicowe i ewentualnie przyrządy pomiarowe, jak liczniki energii, amperomierze czy woltomierze wraz z aparaturą pomocniczą. Jest także pokazane też rozmieszczenie tych aparatów i połączenia między nimi wraz z doprowadzeniem zasilania i wyprowadzeniem obwodów. Plany i schematy instalacji są najważniejszą częścią dokumentacji technicznej. Są one, bowiem podstawą wykonania instalacji zgodnie z projektem. Dokumentacja ma również duże znaczenie dla dokonującego przebudowy rozbudowy instalacji. Jest ona, bowiem pomocna przy jej kontroli i naprawie, gdyż pozwala rozpoznać przebiegi poszczególnych obwodów, ich zabezpieczeń itd. Plany i schematy instalacji elektrycznych rysuje się według określonych zasad z wykorzystaniem różnych symboli rysunkowych (graficznych) oraz skrótowych oznaczeń cyfrowo-literowych. Znajomość tych symboli jest niezbędna do odczytywania i ewentualnego uzupełniania lub poprawiania rysunków. W tabeli 2 zestawiono stosowane symbole rysunkowe i oznaczenia opisowe.

Tabela 1. Przykłady symboli graficznych na schematach instalacji elektrycznych
[opracowanie własne]

Przewody, linie		Łączniki instalacyjne		Odbiorniki energii elektrycznej	
symbol	opis	symbol	opis	symbol	opis
	Przewód, linia		Łącznik jednobiegunowy		Punkt świetlny
	Linia, przewód trójżyłowy		Łącznik świecznikowy		Odbiornik siłowy
	Odgałęzienie przewodów		Łącznik schodowy		Kuchenka elektryczna
	Puszka		Łącznik krzyżowy		Piec elektryczny
			Przycisk łączeniowy		Pralka
			Gniazdo wtyczkowe pojedyncze		Zmywarka do naczyń
			Gniazdo wtyczkowe pojedyncze ze stykiem ochronnym		Siłnik
			Gniazdo wtyczkowe odwójne ze stykiem ochronnym		Lodówka
			Gniazdo antenowe		

Podstawową zasadą jest to, że ciągi przewodów w obwodach rysuje się jedną linią, a liczbę przewodów jednożyłowych lub żył w przewodach wielożyłowych zaznacza się poprzecznymi kreskami lub pojedynczą kreską z odpowiednią cyfrą. Na ogół z przebiegów linii oznaczających ciągi przewodów można się zorientować, czy są one ułożone na ścianach, sufitach czy pod podłogą. Miejsca połączeń przewodów w obwodach rozgałęzionych, a więc również puszki i gniazda rozgałęźne, zaznacza się zaczernionymi kółkami. Podobnie pokazuje się pionowe odcinki obwodów, np. przy przejściu do innych kondygnacji budynku, przy czym ukośną strzałką zaznacza się kierunek tego przejścia: do góry czy w dół. Sprzęt instalacyjny zaznacza się stosownymi symbolami, umieszczonymi przy liniach obwodów. Dodatkowe oznaczenia i skróty literowe wyjaśniają rodzaj instalacji i sprzętu. Na jednym planie mogą być naniesione obwody instalacji elektrycznych zarówno typowych, jak też innych, np. sygnalizacyjnych, z tym, że dla odróżnienia rysuje się je liniami różnej grubości lub nieciągłymi (przerywanymi, kreskami z kropkami itp.). Schematy instalacji zawierają dane, których nie umieszcza się na planach, aby nie zaciemnić ich przejrzystości. Dotyczy to

głównie rozdzielnic z wyraźnym pokazaniem ich zasilania i wyprowadzeń obwodów oraz wyposażenia w urządzenia zabezpieczające, łączeniowe i pomiarowe z zaznaczeniem ich danych znamionowych. Schemat, podobnie jak plany instalacji rysuje się na ogół pojedynczymi liniami łączącymi poszczególne elementy instalacji, przedstawione symbolami graficznymi. Poprzecznymi kreskami zaznacza się liczbę przewodów (żył) i liczbę urządzeń jednobiegunowych, np. bezpieczników topikowych, lub liczbę biegunów, jeśli są to urządzenia wielobiegunowe. Tylko w szczególnych przypadkach skomplikowanych połączeń schematy instalacji rysuje się w całości lub we fragmentach jako tzw. schematy rozwinięte, kreśląc dla każdego obwodu oddzielnymi liniami każdy przewód, a nawet żyły i bieguny w urządzeniach, sprzęcie i osprzęcie.

4.10.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jaka jest definicja instalacji elektrycznej?
2. Jakie są elementy wchodzące w skład instalacji elektrycznej?
3. Jakie znasz układy sieci niskiego napięcia?
4. Co to jest schemat instalacji elektrycznej?
5. Jakie znasz symbole graficzne instalacji elektrycznej?
6. Jakie znasz zabezpieczenia instalacji elektrycznej?

4.10.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Mając dany schemat instalacji elektrycznej rozpoznaj elementy wchodzące w skład tej instalacji. Wypisz i nazwij te elementy.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

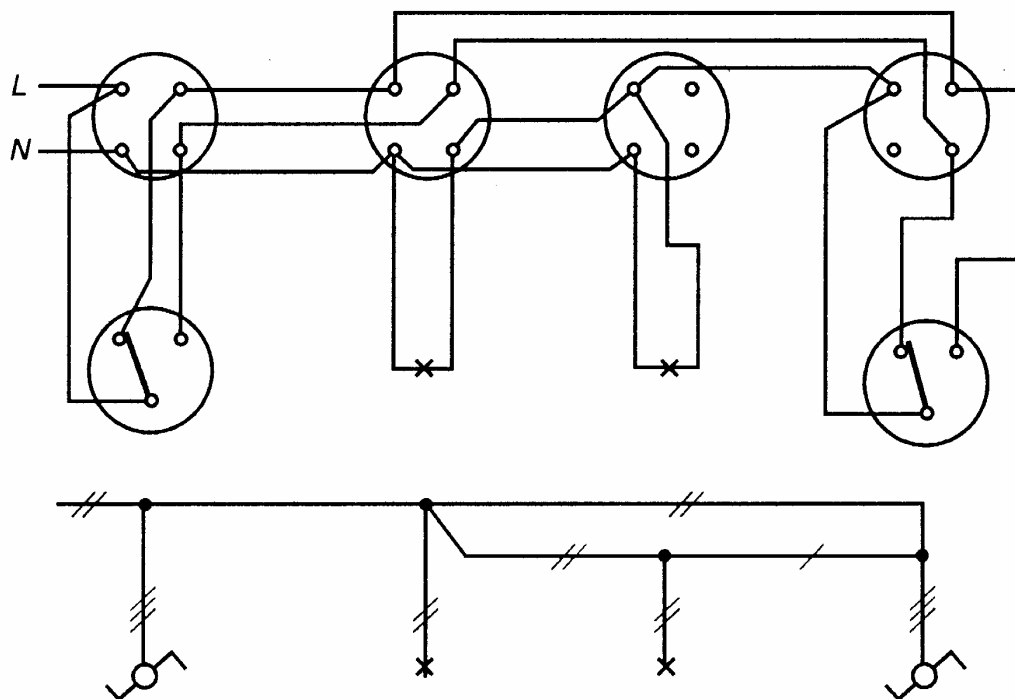
- 1) przerysować schemat instalacji,
- 2) narysować symbole zastosowane w podanej instalacji elektrycznej,
- 3) nazwać narysowane symbole,
- 4) opisać funkcje elementów (których symbole przerysowałeś) w instalacji której schemat poznałeś.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier formatu A4,
- przybory do pisania, cyrkiel, linijka,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą instalacji elektrycznych.

Ćwiczenie 2

Wykonaj i uruchom układ sterowania punktem świetlnym przy użyciu dwóch przełączników schodowych zgodnie ze schematem ideowym przedstawionym na rysunku nr 1). Po sprawdzeniu prawidłowości połączeń elektrycznych, podłącz napięcie zasilania i sprawdź prawidłowość działania układu.



Rysunek do ćwiczenia 2

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinien:

- 1) przeanalizować treść zadania oraz załączony schematy ideowy układu sterowania punktem świetlnym przy użyciu dwóch przełączników schodowych,
- 2) połączyć układ zgodnie z rysunkiem 1,
- 3) sprawdzić zgodność wykonanych połączeń ze schematem ideowym układu z rys. 1,
- 4) dokonać niezbędnych poprawek,
- 5) podłączyć napięcie zasilania i uruchom układ.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- puszki rozgałęźne trzy sztuki,
- przełączniki schodowe dwie sztuki,
- lampy halogenowe dwie sztuki,
- komplet wkrętaków,
- kombinerki,
- nóż monterski,
- przewody do wykonania połączeń,
- szczypce do cięcia przewodów,
- szczypce do ściągania izolacji z przewodów,
- miernik uniwersalny,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą instalacji elektrycznych.

4.10.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyjaśnić definicję instalacji elektrycznej?	☐	☐
2) wymienić elementy instalacji elektrycznej?	☐	☐
3) wymienić elementy instalacji elektrycznej?	☐	☐
4) rozróżnić rodzaje instalacji elektrycznej?	☐	☐
5) scharakteryzować układ sieci TN-C?	☐	☐
6) scharakteryzować układ sieci TN-C-S?	☐	☐
7) scharakteryzować układ sieci TN-S?	☐	☐
8) odczytać schematy instalacji elektrycznej?	☐	☐
9) wykonać instalację oświetleniową według schematu?	☐	☐

4.11. Zasady bezpiecznej eksploatacji urządzeń elektrycznych

4.11.1. Materiał nauczania

Ciało człowieka przewodzi prąd elektryczny, przy czym na drodze jego przepływu tylko naskórek wykazuje znaczną rezystancję, natomiast krew oraz inne płyny organiczne są dobrymi przewodnikami elektrycznymi. Przepływ prądu elektrycznego przez ciało człowieka, czyli rażenie prądem, może wywoływać różne ujemne skutki dla jego zdrowia, a także może być groźny dla życia, może, bowiem doprowadzić do porażenia. Na rezystancji ciała wydzielą się ciepło, które zależnie od wartości prądu może spowodować poważne oparzenia, a nawet spalenie narządów i kończyn. Przepływ prądu przez organy wewnętrzne wywołuje rozkład chemiczny płynów organicznych i powstanie niebezpiecznych toksyn, powodujących zatrucie organizmu. Jednak najbardziej niebezpieczny jest wpływ prądu elektrycznego na pracę serca, działającego przecież pod wpływem bardzo słabych, ustrojowych prądów elektrycznych. Przepływ prądu z zewnętrznego źródła napięcia elektrycznego wytrąca serce z normalnego rytmu skurczów i rozkurczów, przy czym bardzo niebezpieczne są prądy przemienne o małej częstotliwości, a zwłaszcza 50 Hz. Powodowane przez nie migotanie komór sercowych jest najczęstszą przyczyną zgonów. Wyniki wieloletnich badań doprowadziły do wniosku, że zagrożenie porażeniem prądem elektrycznym zależy od wartości prądu, czasu trwania oraz drogi jego przepływu przez ciało człowieka. W tabeli przedstawiono objawy działania prądu przemiennego 50 Hz na człowieka.

Tabela 3. Objawy działania prądu przemiennego 50 Hz na człowieka [opracowanie własne]

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

Rażenie nie jest znacznym zagrożeniem, jeśli prąd rażeniowy nie przekroczy 30 mA, bo nie występuje wtedy jeszcze skurcz mięśni, który uniemożliwiłby oderwanie się rażonego od urządzenia, lub, jeśli czas przepływu prądu przez ciało człowieka nie jest dłuższy niż 0,2 s, choćby prąd osiągnął wiele amperów. Korzysta się, zatem z dwóch sposobów ochrony przed porażeniem prądem przez zastosowanie bardzo niskiego napięcia lub szybkie, samoczynne wyłączenie zasilania urządzenia zagrażającego porażeniem. Na podstawie licznych pomiarów

impedancji ciała ludzi w różnych warunkach ustalono 1 k Ω jako minimalną jej wartość. Jako całkowicie bezpieczne określono urządzenia pracujące przy napięciu przemiennym nieprzekraczającym 25 V o częstotliwości 50 Hz. Zastosowanie tak niskiego napięcia jest jednak ograniczone tylko do odbiorników o bardzo małych mocach, np. lamp przenośnych, używanych w szczególnie niebezpiecznych warunkach otoczenia.

Środki ochrony przeciwporażeniowej

Człowiek doznaje rażenia prądem elektrycznym, gdy dotknie rękoma, ręką i nogą lub innymi częściami ciała części przewodzących, między którymi występuje różnica potencjałów elektrycznych, nazywana napięciem dotykowym. Prąd rażeniowy zależy od wartości tego napięcia i impedancji między miejscami dotyku. Ważne jest, więc, czy rażony jest ubrany, czy ma obuwie i rękawice itd. Najgroźniejsze jest dotknięcie obiema gołymi rękoma lub gołą ręką i obnażonymi plecami. Ważne są też warunki otoczenia, gdyż wilgoć, wyziewy żrące i wysoka temperatura zmniejszają znacznie rezystancję naskórka, stawiającego największy opór przepływowi prądu rażeniowego. Porażenie może nastąpić wskutek dotknięcia przez człowieka zarówno przewodzących prąd części czynnych urządzeń elektrycznych (dotyk bezpośredni), jak i innych części tych urządzeń (np. metalowych obudów), niebędących pod napięciem w normalnych warunkach ich pracy, które jednak zetknęły się z częściami czynnymi na skutek uszkodzenia ich izolacji (dotyk pośredni). Zagrożenie porażeniem następuje przy jednoczesnym dotyku części przewodzących urządzeń nieelektrycznych (np. rur wodociągowych) lub ścian żelbetonowych budynków, mających kontakt z ziemią. Części czynne odbiorczych urządzeń elektrycznych muszą być izolowane, by nie następowało zwarcie między częściami o różnym potencjale elektrycznym, np. między przewodami lub między tymi częściami, a nienależącymi do obwodu elektrycznego elementami przewodzącymi, połączonymi z ziemią (doziemienie). Taka izolacja podstawowa stanowi jednocześnie podstawową ochronę przeciwporażeniową przed dotykiem bezpośrednim. W przypadku części czynnych urządzeń nieizolowanych (np. gołych przewodów przyłączy) ochrona przed bezpośrednim dotykiem polega na umieszczeniu ich poza zasięgiem ręki użytkownika lub zastosowaniu przegród ochronnych, tzn. obudów lub ogrodzeń zapewniających stopień ochrony, co najmniej IP2X. W układach bardzo niskiego napięcia, tzn. o napięciu 25 V w pomieszczeniach suchych, a 12 V w pomieszczeniach wilgotnych i bardzo wilgotnych oraz na zewnątrz budynków, w układzie oznaczonym symbolem SELV, izolacja podstawowa czynnych części urządzeń jest uznawana jako dostateczna ochrona przed porażeniami. Przecież nawet bezpośredni dotyk części czynnych takich urządzeń nie jest groźny dla życia i zdrowia. Obwód taki może być zasilany albo ze specjalnego transformatora bezpieczeństwa (przyłączonego do instalacji 230 V prądu przemiennego), którego konstrukcja uniemożliwia przerzut napięcia 230 V na uzwojenie wtórne, albo z baterii akumulatorów.

W jedno- i trójfazowych obwodach instalacyjnych niskiego napięcia wymaga się zastosowania oprócz ochrony podstawowej również ochrony przeciwporażeniowej przed dotykiem pośrednim (ochrony przy uszkodzeniu) części przewodzących urządzeń niebędących pod napięciem w normalnych warunkach ich pracy. Należy zapewnić ochronę przed porażeniem od urządzenia z uszkodzoną izolacją podstawową, również, gdy to jest niezauważane przez użytkowników. Ochrona taka nie dotyczy urządzeń z osłoną lub obudową z materiałów elektroizolacyjnych, jak np. przewody jednożyłowe w rurach winidurowych, ciągi przewodów wielożyłowych w powłoce polwinitowej, osprzęt rozgałęźny w puszkach bakelitowych, sprzęt łączeniowy w obudowie melaminowej itd. Konieczna jest natomiast zawsze na przykład w obwodach silników elektrycznych i grzejników ze względu na ich metalową obudowę. Ochrona przed dotykiem pośrednim może być realizowana w różny sposób, m.in. przez izolowanie stanowiska pracy przy urządzeniu elektrycznym lub

przez separację elektryczną z zastosowaniem specjalnego transformatora separacyjnego, zasilającego pojedynczy odbiornik, dzięki czemu unika się zamknięcia obwodu prądu rażeniowego. Najczęściej, bowiem wykorzystuje się izolację dodatkową czynnych części urządzeń lub samoczynne wyłączenie zasilania w razie uszkodzenia izolacji podstawowej i pojawienia się niebezpiecznego napięcia dotykowego na obudowach chronionych urządzeń elektrycznych. Pierwsze z tych rozwiązań stosuje się głównie do opraw oświetleniowych i elektrycznego sprzętu gospodarstwa domowego oraz do narzędzi elektrycznych. Urządzenia, w których ochrona jest zapewniona przez izolację podwójną (podstawową i dodatkową) lub izolację wzmocnioną, muszą być wyraźnie oznaczone symbolem . Oznacza to, że ich wykonanie odpowiada warunkom II klasy ochronności. Korzystanie z takich odbiorników jest równie pożądane, jak stosowanie urządzeń w obudowach z materiałów izolacyjnych. Ochrona przed dotykiem pośrednim przez samoczynne wyłączenie zasilania wykorzystuje zabezpieczenia instalacyjne, przy czym jej rozwiązanie zależy od układu sieci zasilającej i instalacji. Istnieją w zasadzie dwa rodzaje tych rozwiązań:

1. Tworzy się takie warunki dla zwarć fazowych, by w razie uszkodzenia izolacji podstawowej w chronionych urządzeniach popłynął prąd zwarciový powodujący dostatecznie szybkie zadziałanie zabezpieczeń nadprądowych i wyłączenie spod napięcia obwodu zasilającego uszkodzone urządzenie.
2. Przez pomiar prądu upływowego z urządzeń odbiorczych do ziemi powoduje się natychmiastowe zadziałanie wyłącznika samoczynnego w obwodzie zasilającym te urządzenia po przekroczeniu określonej wartości prądu upływowego.

W układzie typu TN ochrona przeciwporażeniowa przy uszkodzeniu polega na połączeniu części przewodzących dostępnych (metalowych obudów urządzeń odbiorczych) z uziemionym punktem neutralnym za pomocą przewodu ochronnego PE (lub PEN). Takie rozwiązanie nazywano uprzednio zerowaniem. Możliwe są trzy sposoby realizacji ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu w układach typu TN, różniących się sposobem prowadzenia przewodów PEN, PE i N:

- w układzie TN-C przez przyłączenie obudów urządzeń chronionych bezpośrednio do przewodu ochronno-neutralnego,
- w układzie TN-S przez zastosowanie do tych połączeń oddzielnego przewodu ochronnego, poprowadzonego wzdłuż całej instalacji w obiekcie,
- w układzie mieszanym TN-C-S przez zastosowanie takiego przewodu ochronnego tylko do części odbiorników w obiekcie (budynku), a sieć elektroenergetyczna zasilająca obiekt (budynek) ma wspólny przewód PEN.

Ostatni sposób jest spotykany najczęściej, przy czym osobny przewód ochronny PE stosuje się powszechnie w przewodach przyłączonych do wszystkich chronionych odbiorników ruchomych (przenośnych lub przewoźnych). W tym przypadku podział przewodu PEN na przewody PE i N dokonuje się w gniazdach wtyczkowych. W dążeniu do poprawy warunków bezpieczeństwa pod względem porażeniowym zaczęto od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku upowszechniać w krajach zachodnich stosowanie wyłączników ochronnych różnicowoprądowych (oznaczanych symbolem ΔI), zwłaszcza w instalacjach wiejskich. W wyłącznikach tych wykorzystuje się jako człon pomiarowy przekładnik Ferrantiego, który wytwarza napięcie proporcjonalne do prądu upływowego z zabezpieczonego obwodu instalacyjnego. Napięcie to wykorzystywane jest do wyzwania wyłącznika samoczynnego, zamontowanego zwykle na wyprowadzeniu obwodu z rozdzielnicy. Konstrukcja wyłączników ochronnych tego typu podlegała różnym modyfikacjom w miarę pojawiania się coraz doskonalszych materiałów ferromagnetycznych oraz układów elektronicznych. W rezultacie uzyskano urządzenie bardzo czułe i pewne w działaniu, o zwartej budowie i stosunkowo tanie, które jest ze znanych dotychczas najdoskonalszym środkiem ochrony przeciwporażeniowej. Stosownie do tego zmieniały się

wymagania techniczne dotyczące środków ochrony przed porażeniem prądem w urządzeniach odbiorczych prądu przemiennego. Wprowadzono obowiązek powszechnego stosowania wyłączników ochronnych różnicowoprądowych w instalacjach w domach mieszkalnych, w obiektach gospodarskich i na dworze. Obecnie dostępne są na rynku wyłączniki ochronne różnicowoprądowe o bardzo dużej czułości, wyłączające obwód w razie pojawienia się prądu upływowego o bardzo małej wartości (nawet 10 i 30 mA). Działają one niemal natychmiastowo, bo w czasie krótszym niż 0,04 s. Takie bardzo czułe wyłączniki ochronne różnicowoprądowe o znamionowym prądzie różnicowym niewiększym od 30 mA mogą, zatem chronić przed porażeniem ludzi i zwierzęta, również przy bezpośrednim dotknięciu części czynnych urządzeń elektrycznych, pozostających stale pod napięciem. Uzupełniają one w tym przypadku ochronę przed dotykiem bezpośrednim. Uznaje się je za szczególnie skuteczny środek ochrony przed dotykiem pośrednim i to szczególnie w warunkach zwiększonego zagrożenia porażeniowego. Ochrona przed dotykiem bezpośrednim jest uzupełniającą, cenną zaletą tego rozwiązania. Chodzi o to, by nie dopuszczać do użytkowania urządzeń w metalowej obudowie lub osłonie z uszkodzoną izolacją podstawową. Wyłącznik ochronny wymaga zawsze stosowania w instalacjach układu TN-S.

Połączenia wyrównawcze pełnią podobną szczególnie korzystną funkcję ochronną, uzupełniającą inne zastosowane środki ochrony przeciwporażeniowej. Dotyczy to zwłaszcza warunków zwiększonego zagrożenia porażeniowego występujących w łazienkach, ciasnych pomieszczeniach wyposażonych w liczne urządzenia z metalową obudową lub w pomieszczeniach hodowlanych. Nieuziemione przewody połączeń wyrównawczych powinny łączyć wszystkie części przewodzące jednocześnie dostępne urządzeń elektrycznych i innych. Mogą to być przewody ochronne, części przewodzące zarówno dostępne, jak i obce, które mogą być dotknięte przez ludzi lub zwierzęta. Taka ekwipotencjalizacja (wyrównanie potencjału) zapobiega pojawianiu się niebezpiecznych napięć dotykowych w chronionym obszarze, nawet w przypadku wystąpienia w całym układzie połączeń napięcia względem ziemi wskutek uszkodzenia izolacji w którymś urządzeniu elektrycznym, przepięć od instalacji piorunochronnej lub z innych przyczyn. Należy jednak zadbać, by inne zabezpieczenia zapobiegały trwałemu utrzymywaniu się takiego stanu.

Ochrona układzie TN-C

Ochrona przeciwporażeniowa przy uszkodzeniu urządzenia przed niebezpiecznym napięciem przy dotyku pośrednim (dawne zerowanie) w instalacjach zasilanych z sieci 230/400 V w układzie TN polega na przyłączeniu do przewodu ochronno-neutralnego PEN bezpośrednio lub za pomocą odcinka przewodu ochronnego – przewodzącej (metalowej) obudowy każdego podlegającego ochronie odbiornika i elementu instalacji. Jest to ochrona przez wyłączanie zasilania (dawniej nazywane zerowaniem). W tak realizowanej ochronie dąży się do zmniejszenia impedancji pętli zwarciorowej, czyli obwodu zwarcia przewodu fazowego z przewodem ochronnym lub częścią przewodzącą dostępną wskutek uszkodzenia izolacji podstawowej w chronionym urządzeniu. Powinno to wywołać przepływ prądu zwarciorowego, który spowoduje zadziałanie zabezpieczenia nadprądowego i wyłączenie uszkodzonego urządzenia. Warunek samoczynnego wyłączenia zasilania w wymaganym czasie jest spełniony, gdy:

$$Z_s I_a \leq U_0$$

przy czym:

Z_s – impedancja pętli zwarciorowej, w Ω ,

I_a – prąd powodujący samoczynne zadziałanie urządzenia ochronnego, w A,

U_0 – napięcie nominalne instalacji względem ziemi, w V.

Czas wyłączenia obwodów odbiorczych zasilających urządzenia ręczne lub przenośne I klasy ochronności powinien być krótszy niż 0,4 s w warunkach środowiskowych normalnych,

a krótszy niż 0,2 s w warunkach środowiskowych stwarzających zwiększone zagrożenie przy napięciu 230 V. Wartość prądu w obwodzie zwarcia jest ograniczana przez impedancję przewodów: fazowego i ochronno-neutralnego oraz impedancję miejsca zwarcia. Im bliżej zacisku odbiornika występuje zwarcie (zwarcie pełne), tym większy jest prąd zwarcia, a napięcie dotykowe wyższe niż 100 V, ale tym pewniej i szybciej następuje wyłączenie zasilania. Natomiast im bliżej punktu neutralnego odbiornika zostaje uszkodzona izolacja podstawowa lub im większa jest rezystancja w miejscu zwarcia, tym mniejszy jest prąd zwarcia oraz tym niższe napięcie dotykowe, aż do niegroźnego poziomu, gdy wartość prądu jest na tyle mała, że nie spowodowałaby zadziałania zabezpieczenia nadprądowego. Mogą się jednak zdarzyć przypadki bardzo groźne, gdy przy pełnym zwarcu w urządzeniu chronionym nie zadziała zabezpieczenie nadprądowe. Wówczas, nie tylko na obudowie tego urządzenia utrzymuje się napięcie dotykowe wyższe niż 100 V, lecz także przenosi się ono przewodem ochronno-neutralnym na przyłączone do tego przewodu obudowy innych, nieuszkodzonych urządzeń we wszystkich obwodach odbiorczych. Długie linie niskiego napięcia, a niekiedy również długie obwody instalacyjne są powodem występowania dużej impedancji pętli zwarcia, ograniczającej wartości prądu zwarcia, co obniża pewność szybkiego działania zabezpieczeń nadprądowych przy zwarcach jednofazowych. Wynika z tego obowiązek sprawdzania skuteczności ochrony przy uszkodzeniu (przy dotyku pośrednim). Polega on na pomiarze impedancji obwodu zwarcia w najdalszych punktach od zasilania i sprawdzeniu, czy najbliższe zabezpieczenia nadprądowe zadziałają dostatecznie szybko przy ewentualnym zaistnieniu zwarcia. Badania takie są konieczne, zwłaszcza przy zwiększaniu mocy użytkowanych urządzeń odbiorczych i wymianie zabezpieczeń na „mocniejsze”. Jeśli warunek skuteczności ochrony nie jest spełniony, należy przebudować instalację w celu zastosowania przewodów o większych przekrojach (dla zmniejszenia ich rezystancji). Może być konieczne zwiększenie przekrojów przewodów w liniach niskiego napięcia lub bardziej radykalna przebudowa sieci niskiego napięcia przez dobudowanie dodatkowych stacji transformatorowych i skrócenie długości obwodów sieci niskiego napięcia do odbiorców. Samowolna wymiana zabezpieczeń nadprądowych na inne o większej wartości prądu znamionowego, jak również „naprawianie” bezpieczników topikowych w podobnym celu jest zabronione, może, stworzyć zagrożenie porażeniem nie tylko samego sprawcy i jego rodziny, lecz także sąsiadów. Przewód ochronno-neutralny w sieci niskiego napięcia jest elementem obwodów elektrycznych, przez który płynie prąd wyrównawczy zależnie od obciążenia poszczególnych faz i różnych zdarzeń eksploatacyjnych. Na przewodzie tym – mimo jego uziemienia – występuje pewne napięcie względem ziemi, zmieniające się w czasie i zróżnicowane na długości poszczególnych linii. W normalnych warunkach pracy sieci napięcie to ma niewielką wartość i przyłączenie do przewodu ochronno-neutralnego metalowych obudów urządzeń odbiorczych nie stwarza zagrożenia porażeniem prądem od tych urządzeń. Jednak takie zagrożenie może powstać, na przykład przy przerwaniu ciągłości połączeń lub samego przewodu ochronno-neutralnego oraz przy doziemieniu przewodu fazowego. W celu złagodzenia skutków przerwy w przewodzie ochronno-neutralnym PEN (ze względu na rozkład napięcia na tym przewodzie względem ziemi) wymaga się jego wielokrotnego uziemiania w całej sieci, w odstępach nie większych niż 500 m i na końcach linii. Najniebezpieczniejsza jest, bowiem przerwa w ciągłości przewodu PEN w takim miejscu, że pozostaje część nieuziemiona, do której są przyłączone odbiorniki jednofazowe. Część ta po załączeniu choćby jednego odbiornika znajdzie się pod niebezpiecznym napięciem względem ziemi, przenosząc to napięcie na obudowy wszystkich urządzeń, dołączone do tej części przewodu ochronno-neutralnego. Obecnie z tego względu jest obowiązkowe stosowanie osobnego przewodu ochronnego PE (w układzie TN-S) na całej długości obwodów instalacyjnych, począwszy od złącza lub rozdzielnic głównej, gdzie powinno być wykonane uziemienie przewodu ochronno-

neutralnego. Dawniej, względy oszczędnościowe powodowały, że tylko w przewodach do odbiorników ruchomych, w których często zdarzają się przerwy żył tych przewodów, wymagano zawsze, by miały one osobną żyłę ochronną, dołączoną do metalowej obudowy odbiornika z jednej strony i do przewodu ochronno-neutralnego w instalacji stałej w gnieździe wtyczkowym (układ TN-C-S) z drugiej strony. To drugie połączenie wymaga dodatkowego styku ochronnego w gnieździe wtyczkowym i wtyczce. Najczęściej stosuje się taki sposób, że gniazdo jest wyposażone w długi bolec wtykowy, a wtyczka w odpowiednią tuleję wtykową. Bolec w gnieździe jest dłuższy od bolców stykowych we wtyczce, co powoduje, że połączenie przewodu ochronnego następuje przed zetknięciem się styków przewodów: fazowych i neutralnego. Połączenie przewodu ochronnego z neutralnym jest wykonane za pomocą metalowej blaszki, tzw. mostka, w samym gnieździe wtyczkowym. Takie rozwiązanie konstrukcyjne zapobiega pomyłkowemu zestawieniu połączeń styków. Umożliwia także przyłączenie odbiorników II klasy ochronności (z izolacją podwójną lub wzmocnioną) lub z obudową izolowaną, bez żyły ochronnej w przewodzie zasilającym, zakończonym taką samą wtyczką z otworem na bolec ochronny. Spotyka się gniazda i wtyczki ze stykami ochronnymi w innym, starszym wykonaniu, np. umieszczonymi na zewnętrznej powierzchni wtyczki i wewnętrznej w gnieździe; takie rozwiązanie nie jest jednak tak uniwersalne, jak opisane poprzednio. Przy przerwie przewodu ochronno-neutralnego w sieci – co jest łatwo dostrzegalne – napięcie na tym przewodzie względem ziemi nie osiąga tak dużych wartości (częste uziemienia), jak przy przerwie tego przewodu w instalacji, przy czym zależy to od miejsca przerwy, mocy przyłączonych odbiorników jednofazowych i rezystancji uziemień. Może się jednak zdarzyć, że na metalowych obudowach nieuszkodzonych urządzeń, połączonych z przewodem PEN dla zapewnienia ochrony przeciwporażeniowej przed dotykiem pośrednim, wystąpią niebezpieczne napięcia dotykowe, a urządzenia nie zostaną samoczynnie wyłączone. Z tego wynika zakaz stosowania zabezpieczeń w przewodzie ochronno-neutralnym (np. bezpieczników topikowych), które mogłyby spowodować przerwę w tym przewodzie, oraz zalecenie szczególnie starannego wykonania połączeń tego przewodu. Równie niebezpieczne, choć rzadko się zdarzające, są doziemienia przewodu fazowego w sieci lub instalacjach. Wówczas na przewodach ochronno-neutralnych i na długich odcinkach wielu linii zasilanych z jednej stacji transformatorowej oraz na metalowych obudowach chronionych urządzeń odbiorczych zasilanych z tych linii mogą występować napięcia nawet wyższe niż np. 100 V, aż do czasu zadziałania odpowiednich zabezpieczeń w rozdzielnicach niskiego napięcia w stacji transformatorowej. Wiele wypadków porażień zdarza się na skutek zamiany przewodu PEN z fazowym podczas remontów instalacji (zwłaszcza przy zasilaniu innych budynków). Wtedy na metalowych obudowach chronionych urządzeń stacjonarnych pojawia się pełne napięcie 230 V i utrzymuje się długo. Jak wynika z powyższego omówienia zagrożeń porażeniem pochodzących od urządzeń z metalową obudową, przyłączoną do przewodu ochronno-neutralnego (i to bez uszkodzonej izolacji podstawowej), przy wszelkich pracach elektromontażowych w instalacjach i sieciach, w których stosuje się taką ochronę przed dotykiem pośrednim, należy zwracać szczególną uwagę na sprawdzenie skuteczności tej ochrony i na możliwe, poważne konsekwencje ewentualnych pomyłkowych połączeń.

4.11.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jaka jest definicja ochrony przeciwporażeniowej?
2. Jakie są skutki działania prądu na organizm ludzki?
3. Jakie są środki podstawowej i dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej?
4. Jaka rolę odgrywa przewód neutralny, a jaką ochronny?

4.11.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Przeanalizuj sposoby ochrony przeciwporażeniowej w twojej pracowni.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) wypisać cele ochrony przeciwporażeniowej,
- 2) określić sposoby realizacji ochrony podstawowej i dodatkowej,
- 3) zapoznać się z układem zasilania pracowni,
- 4) rozpoznać urządzenia używane do ochrony przeciwporażeniowej,
- 5) przeanalizować wynik pomiarów parametrów tych urządzeń.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier formatu A4, przyrządy do pisania,
- schematy instalacji zasilającej pracownię,
- protokoły z pomiarów parametrów urządzeń ochrony przeciwporażeniowej,
- katalogi aparatury elektrycznej,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą ochrony przeciwpożarowej.

Ćwiczenie 2

Dobierz środki ochrony przeciwporażeniowej do urządzenia wskazanego przez nauczyciela.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) odszukać w kartach katalogowych dane znamionowe urządzenia,
- 2) zanotować te wielkości,
- 3) na podstawie wypisanych wartości danych znamionowych urządzenia dobrać zabezpieczenie elektryczne tego urządzenia,
- 4) dobrać typ wyłącznika różnicowoprądowego.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier formatu A4, przybory do pisania,
- dokumentacja techniczna urządzenia,
- katalogi aparatury elektrycznej,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą ochrony przeciwpożarowej.

4.11.4. Sprawdzian postępów

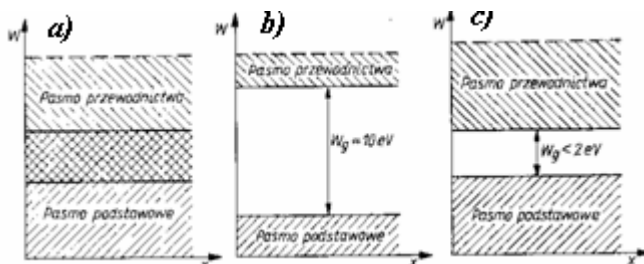
Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) zdefiniować pojęcie ochrony przeciwporażeniowej?	☐	☐
2) wyjaśnić działanie prądu na organizm ludzki?	☐	☐
3) wymienić sposoby ochrony przeciwporażeniowej?	☐	☐
4) scharakteryzować działanie wyłącznika różnicowoprądowego?	☐	☐

4.12. Podstawowe elementy i układy elektroniczne

4.12.1. Materiał nauczania

Półprzewodnikami nazywamy materiały, których rezystywność $\rho = 10^{-3} \div 10^3 \, \Omega \, \text{cm}$ jest dużo mniejsza niż rezystywność izolatorów $\rho = 10^{10} \div 10^{20} \, \Omega \, \text{cm}$, a większa niż rezystywność przewodników $\rho = 10^{-6} \div 10^{-5} \, \Omega \, \text{cm}$. Podział materiałów stosowanych w elektronice, ze względu na własności elektryczne wynika z modelu pasmowego. Przewodzenie prądu zależy od tego, czy nośniki ładunku, np. elektrony mogą się poruszać swobodnie w materiale. Dobry przewodnik ma dużo swobodnych elektronów, natomiast w półprzewodniku jest ich w normalnej temperaturze stosunkowo niewiele. Układ pasm energetycznych w półprzewodniku (rys. 74) jest podobny do układu pasm izolatorów, szerokość pasma wzbronionego jest jednak niewielka, wskutek czego jest możliwe przewodzenie prądu przez półprzewodnik już w temperaturze pokojowej. Energia



Rys. 74. Układ pasm energetycznych: a) w przewodniku, b) w izolatorze, c) w półprzewodniku [opracowanie własne]

reprezentowana przez szerokość pasma zabronionego W_g , mierzona w elektronowoltach (eV) jest najmniejszą energią potrzebną do zerwania wiązania elektronu walencyjnego i znalezienia się w paśmie przewodnictwa. Mniejsza energia nie może uwolnić elektronu z wiązania walencyjnego. Wynika stąd, że elektrony mogą przechodzić przez pasmo wzbronione, ale nie mogą w nim pozostawać. Rozróżnia się półprzewodniki samoistne i niesamoistne. Do pierwszych zalicza się te substancje, których szerokość pasma zabronionego jest tak mała (np. ZnO – 0,4 eV, UO_2 – 0,25 eV), że już w temperaturze pokojowej wykazują dość znaczną konduktywność. Mechanizm przewodzenia polega tu na przechodzeniu elektronów z pasma podstawowego do pasma przewodnictwa wskutek ruchów cieplnych. Gdy elektron opuszcza pasmo podstawowe (walencyjne), pozostaje tam puste wiązanie kowalentne, które jest nazywane „dziurą”. Dziura umożliwia ruch ładunku, a zatem przewodzenie przez elektrony walencyjne. Znajdujący się w pobliżu elektron pasma walencyjnego może wypełnić dziurę i w ten sposób stworzyć następną, bez, żadnej wymiany energii. Gdyby elektrony i dziury dały się obserwować, można by zobaczyć wtedy, że zamiast elektronów porusza się dziura. Dziura zachowuje się jak dodatni ładunek elektryczny, ponieważ porusza się w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu elektronu.

Półprzewodniki niesamoistne charakteryzują się tak dużą szerokością pasma zabronionego (Ge – 0,75 eV, Si – 1,12 eV), że w normalnych temperaturach mają znikomo małą konduktywność. Właściwości te ulegają zmianie przy pojawieniu się tzw. defektów sieci krystalicznej, spowodowanych niewielkimi domieszkami pierwiastków trój- lub pięciowartościowych.

Półprzewodnik typu n powstaje przez domieszkowanie monokryształu germanu lub krzemu pierwiastkiem o pięciu elektronach walencyjnych, np. arsenem lub antymonem. Zastąpienie atomu germanu lub krzemu przez atom arsenu powoduje, że jeden elektron jest z nim luźno związany. Dostarczenie mu niewielkiej energii (ok. 0,05 eV) sprawia, że staje się on elektronem swobodnym, poruszającym się w przestrzeni między atomami domieszkowanego kryształu.

Półprzewodnik typu p powstaje przez domieszkowanie pierwiastkami o trzech elektronach walencyjnych, np. indem lub galem. Domieszka taka powoduje, że jedno z wiązań międzyatomowych jest niekompletne. Wskutek braku elektronu powstaje tzw. dziura, co oznacza, że wiązanie to bardzo łatwo może przyłączyć dowolny elektron swobodny lub

walencyjny sąsiedniego atomu. Do przemieszczenia elektronu walencyjnego z sąsiedniego atomu jest potrzebna energia ok. 0,08 eV.

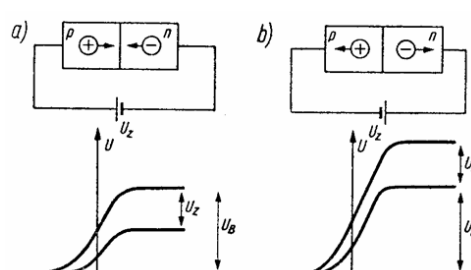
W półprzewodniku typu n istnieje nadmiar elektronów swobodnych, są one nośnikami większościowymi prądu, natomiast w półprzewodniku typu p nośnikami większościowymi stają się nadmiar dziur.

Złącze pn powstaje w płytce półprzewodnikowej, której część ma przewodność typu p, część typu n (rys. 75a). Przez złącze dyfundują ładunki elektryczne większościowe (rys. 75b), a więc elektrony z obszaru n do p i dziury z obszaru p do n. Ładunki większościowe ulegają rekombinacji po przejściu przez złącze, natomiast nowe powstają stale wskutek generacji. W wyniku dyfuzji i rekombinacji w strefie granicznej tworzy się obszar pozbawiony nośników, zwany warstwą zaporową. W obszarze n występuje niedomiar elektronów, a w obszarze p niedomiar dziur, co powoduje powstanie na złączu różnicy potencjałów U_B o zwrocie dodatnim w kierunku obszaru n (rys. 73c). Ta różnica potencjałów hamuje ruch nośników większościowych przyspieszając ruch elektronów z obszaru p do obszaru n oraz dziur z obszaru

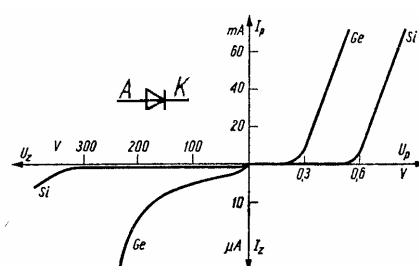


Rys. 75. Złącze pn: a) schemat, b) gęstość ładunków większościowych, c) rozkład potencjału [opracowanie własne]

n do p. Ruch ten, tzw. prąd cieplny obejmuje wszystkie nośniki mniejszościowe i w stanie spoczynku równy jest prądowi dyfuzji nośników większościowych. Jeżeli spolaryzować złącze pn w kierunku przewodzenia (rys. 76a), to nastąpi wymuszenie ruchu nośników większościowych w kierunku warstwy zaporowej. Na granicy obszarów następuje rekombinacja dziur i elektronów, a więc w obwodzie płynie prąd, elektroda ujemna źródła, bowiem stale dostarcza elektronów, a elektroda dodatnia stale je odbiera. Prąd ten może osiągać duże wartości przy małym spadku napięcia na złączu pn, warstwa n odgrywa rolę katody, a warstwa p rolę anody. Polaryzacja złącza pn w kierunku zaporowym (rys. 76b) powoduje odprowadzenie nośników większościowych ze strefy granicznej obszarów n i p i znaczne poszerzenie warstwy zaporowej, przez którą płynie wówczas jedynie prąd cieplny o bardzo małej wartości. Element zawierający jedno złącze pn nazywamy diodą półprzewodnikową. Diody dzielimy na: prostownicze – do prostowania prądu zmiennego, diody Zenera – do stabilizacji napięć, fotodiody, diody pojemnościowe itp.



Rys. 76. Polaryzacja złącza pn w kierunku: a) przewodzenia, b) zaporowym



Rys. 77. Charakterystyka diody prostowniczej [opracowanie własne]

Dioda prostownicza (warstwowa)

W diodach półprzewodnikowych wykorzystuje się złącza pn, wytworzone w odpowiednich płytkach germanu lub krzemu. Diody półprzewodnikowe odznaczają się małym spadkiem napięcia w kierunku przewodzenia, wynosi on zwykle $0,1 \div 0,3$ V dla diod germanowych oraz $0,6 \div 0,8$ V dla diod krzemowych. Napięcia te nazywamy progowymi i oznaczamy U_F , a prąd płynący przez diodę przez I_F . Charakterystyka prądowo-napięciowa diody pokazana jest na rys. 77. Podstawowe parametry diody prostowniczej to:

1. Napięcie graniczne, czyli największa wartość napięcia wstecznego, która nie wywołuje uszkodzenia diody.
2. Dopuszczalny średni prąd przewodzenia, jaki może przepływać przez diodę.
3. Dopuszczalne średnie napięcie przewodzenia.
4. Maksymalne straty mocy przy dane temperaturze otoczenia.
5. Dopuszczalna temperatura złącza, dla diod Ge wynosi 80° , dla Si 150°C .

Dioda Zenera

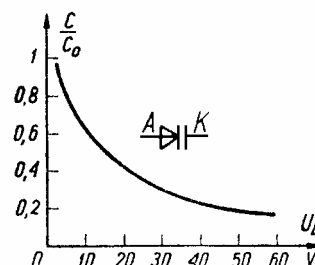
W diodach warstwowych przy dostatecznie dużym napięciu zaporowym prąd wsteczny gwałtownie wzrasta (rys. 78). Wartość napięcia, przy którym następuje gwałtowny wzrost prądu, jest stała i nie zależy od zmian prądu w szerokich granicach. Zjawisko gwałtownego wzrostu prądu tłumaczy efekt Zenera, czyli efekt emisji elektronów w złączu pod wpływem pola wewnętrznego. W cienkim złączu natężenie pola może uzyskiwać duże wartości przy małych napięciach U_Z nawet rzędu 3 V, prowadząc do rozrywania wiązań kowalencyjnych. W rezultacie możliwy jest duży wzrost prądu przy pomijalnym wzroście napięcia na złączu, zwanego napięciem Zenera. Diody Zenera są produkowane na napięcia $3 \div 600$ V, przy dopuszczalnej mocy złącza 250 mW i 1 W bez radiatora oraz 5 W z radiatorem. Maksymalny prąd diody określa zależność:

$$I_{Zmax} = \frac{P}{U_Z}$$

Za minimalną wartość prądu Zenera przyjmuje się $I_{Zmin} = 0,1 I_{Zmax}$. Dla prądów mniejszych od I_{Zmin} spadek napięcia na diodzie silnie zależy od prądu diody.

Dioda elektroluminescencyjna

W półprzewodnikach wykorzystuje się zjawisko elektroluminescencji,  czyli przemianę energii elektrycznej na świetlną w złączu pn. Stosuje się do tego celu diody z np. GaAs (arsenek galu) polaryzowane w kierunku przewodzenia. W zależności od materiału złącza i jego domieszkowania można otrzymać źródła promieniowania podczerwonego oraz źródła promieniowania widzialnego w kolorach czerwonym lub zielonym. Dzięki krótkim czasom narastania impulsów światła (rzędu nano- lub pikosekund) diody elektroluminescencyjne można stosować w szybkich układach automatyki i maszynach cyfrowych do sprzęgania różnych obwodów. Diody te charakteryzują się poborem prądu $20 \div 500$ mA przy napięciu $1 \div 4$ V.



Rys. 79. Charakterystyk diody pojemnościowej [opracowanie własne]

Dioda pojemnościowa, warikap

W naładowanym kondensatorze elektrycznym występują dwa ładunki - Q oraz $+Q$ oddzielone warstwą izolatora, a więc występuje zjawisko podobne, jak w złączu pn.

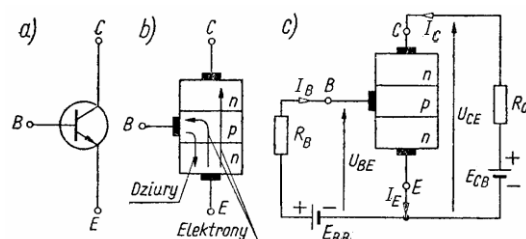
Pojemność tego złącza zależy od pola powierzchni granicznej oraz od grubości warstwy zaporowej. Zmiana napięcia polaryzującego diodę powoduje zmianę grubości warstwy zaporowej i zmianę pojemności elektrycznej złącza pn. Pojemność C złącza jest funkcją napięcia między końcówkami diody (rys. 79). Maksymalne napięcie polaryzacji warikapów nie przekracza $60 \div 80$. Są to na ogół diody krzemowe. Pojemność warikapów wynosi $20 \div 30$ pF. Używane w obwodach rezonansowych. Pracują przy polaryzacji zaporowej złącza.

Fotodioda

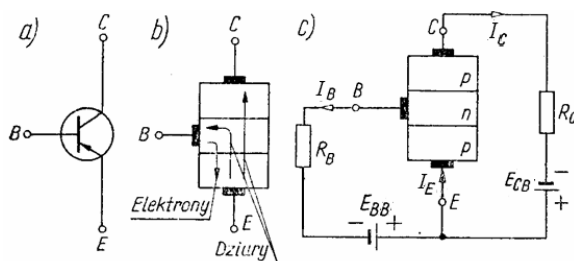
Działanie fotodiody  wyjaśniono na rys. 80, na którym 1 oznaczono ładunki przestrzenne zgromadzone na granicy obszarów o przewodności typu p oraz n. Kwanty energii promienistej, powodując jonizację atomów złącza pn, zwiększają liczbę par elektron-dziura 2. Elektrony swobodne są przyciągane przez dodatni ładunek przestrzenny na granicy obszaru typu n, dziury zaś wędrują do obszaru typu p. Prąd przewodzenia złącza pn zwiększa się wraz ze wzrostem strumienia świetlnego Φ . Fotodioda pracuje przy polaryzacji zaporowej. Charakterystykę prądowo-napięciową pokazano na rys. 78b. Fotodiody germanowe charakteryzują się dużą czułością rzędu 30 mA/lm, dla światła o długości fali $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$, zaś fotodiody krzemowe dla światła o długości fali $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$. Fotodiody są stosowane w urządzeniach komutacji optycznej, w przetwornikach analogowo-cyfrowych, w fotoogniwach.

Tranzystor bipolarny

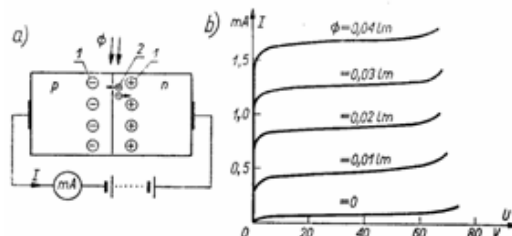
Tranzystor złączowy jest to półprzewodnik, w którym wytworzono blisko siebie dwa złącza p-n. Tranzystor złożony z obszaru p umieszczonego między dwoma obszarami n nazywamy tranzystorem typu n-p-n, a złożony z obszaru n umieszczonego między dwoma obszarami p tranzystorem p-n-p (rys. 81b,c). W tranzystorze złączowym obszar środkowy, wspólny dla obu złącz, nazywamy bazą B, zaś obszary skrajne emiternem E oraz kolektorem C. Złącze utworzone przez emiter i bazę nosi nazwę złącza emiterowego, a złącze utworzone przez bazę i kolektor złącza kolektorowego. Podczas normalnej pracy tranzystora złącze emiterowe jest spolaryzowane przepustowo, natomiast złącze kolektorowe zaporowo. W tranzystorze n-p-n właściwą polaryzację złącz uzyskuje się łącząc biegun ujemny baterii bazy E_{BB} z emiternem oraz biegun dodatni baterii, kolektora E_{CB} z kolektorem (rys. 81c). Przez złącze emiterowe płyną prądy nośników większościowych. Dziury są wstrzykiwane z obszaru bazy do obszaru emiternem, elektrony zaś z obszaru emiternem do obszaru bazy, podobnie jak w spolaryzowanej przepustowo diodzie. Elektrony wstrzyknięte do obszaru bazy dyfundują w kierunku złącza kolektorowego, przy czym tylko niewielka ich ilość rekombinuje (łączy się) z nośnikami większościowymi bazy, dziurami. Elektrony w pobliżu



Rys. 81. Tranzystor npn: a) symbol graficzny, b) przepływ ładunków, c) polaryzacja elektrod [opracowanie własne]

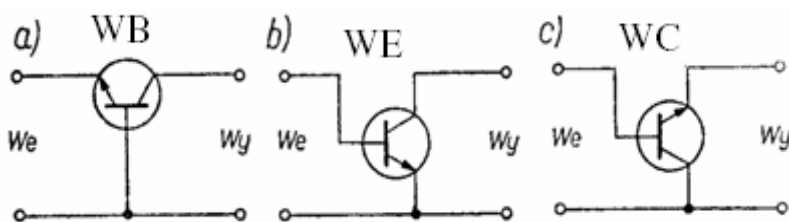


Rys. 82. Tranzystor pnp: a) symbol graficzny, b) przepływ ładunków, c) polaryzacja elektrod [opracowanie własne]



Rys. 80. Fotodioda: a) zasada działania, b) charakterystyka prądowo-napięciowa [opracowanie własne]

złącza kolektorowego dostają się w obszar silnego pola elektrycznego (biegun dodatni baterii kolektorowej jest połączony z kolektorem) i jako prąd unoszenia przedostają się do kolektora. Gdy szerokość bazy jest dostatecznie mała prawie wszystkie elektrony wstrzyknięte z emitera do bazy przedostają się do kolektora. Złącze kolektorowe jest spolaryzowane w kierunku zaporowym, nie występuje, więc tu wstrzykiwanie nośników większościowych z kolektora. W obwodzie kolektora płynie prąd o wartości zależnej od prądu bazy (od napięcia baterii bazy polaryzującej złącze emiterowe). Przy prądzie bazy równym zeru w obwodzie kolektora płynie niewielki prąd, zwany prądem zerowym kolektora (prądem spoczynkowym kolektora), wywołany nośnikami mniejszościowymi kolektora, czyli dziurami. Prąd zerowy rosnący wraz ze wzrostem temperatury tranzystora ma taki sam charakter, jak prąd diody spolaryzowanej w kierunku zaporowym. Prąd płynący w obwodzie kolektora jest zawsze sumą prądu zerowego oraz prądu wywołanego zmianami prądu bazy. Na rys. 82 pokazano tranzystor pnp. Zasada działania tego typu tranzystora jest podobna do tranzystora npn, różnica jest w polaryzacji elektrod. Ponieważ działanie tranzystora pnp (npn) oparte jest na przepływie zarówno prądu elektronowego, jak i dziurowego, nazywamy go tranzystorem bipolarnym. Na rys. 83 pokazano trzy konfiguracje pracy tranzystora npn noszące nazwy: wspólna baza WB (rys. 83a), wspólny emiter WE (rys. 83b), wspólny kolektor WC (rys. 83c). Nazwy wynikają stąd, że tranzystor możemy traktować jako czwórnik, czyniąc jedną z elektrod wspólną dla wejścia i wyjścia.

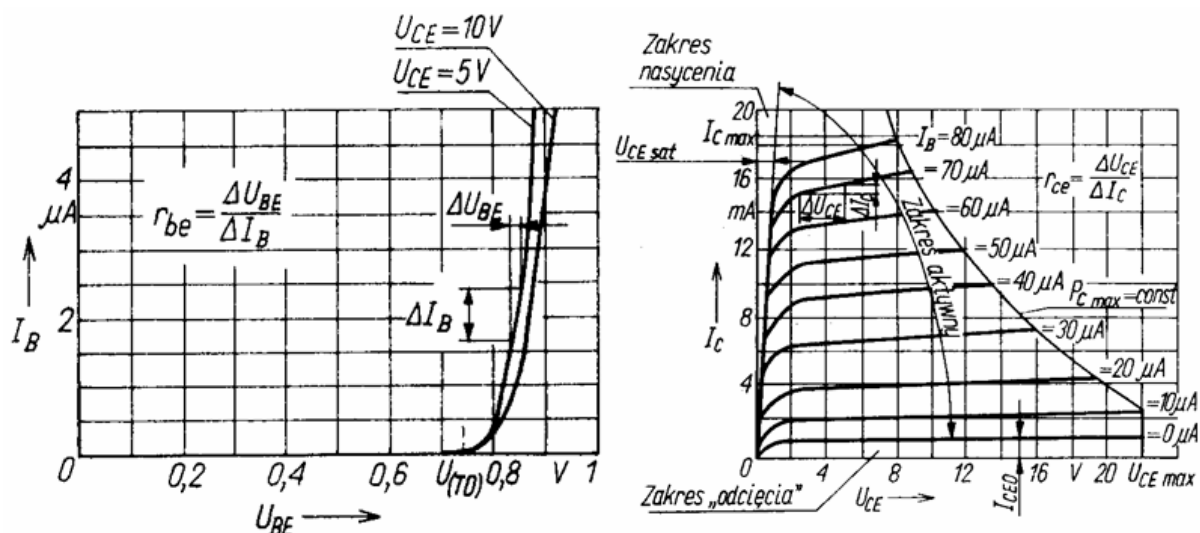


Rys. 83. Konfiguracje pracy tranzystora npn: a) wspólna baza WB, b) wspólny emiter WE, c) wspólny kolektor WC
[opracowanie własne]

- | | |
|---|---|
| <p>Wielkości wejściowe w układzie:</p> <ul style="list-style-type: none"> – WB napięcie U_{EB} i prąd I_E, – WE napięcie U_{BE} i prąd I_B, – WC napięcie U_{BC} i prąd I_B. | <p>Wielkości wyjściowe w układzie:</p> <ul style="list-style-type: none"> – WB napięcie U_{CB} i prąd I_C, – WE napięcie U_{CE} i prąd I_C, – WC napięcie U_{EC} i prąd I_E. |
|---|---|

- Właściwości tranzystora opisują rodziny jego charakterystyk:
- wejściowa $I_B = f(U_{BE})$ przy $U_{CE} = \text{const}$,
 - zwrotna napięciowa $U_{BE} = f(U_{CE})$ przy $I_B = \text{const}$,
 - przejściowa prądowa $I_C = f(I_B)$ przy $U_{CE} = \text{const}$,
 - wyjściowa $I_C = f(U_{CE})$ przy $I_B = \text{const}$.

W katalogach elementów półprzewodnikowych przeważnie podawane są charakterystyki wejściowa i wyjściowa. Na rys. 82 pokazano charakterystyki wejściową (rys. 84a) i wyjściową (rys. 84b) tranzystora npn w układzie WE.



Rys. 84. Charakterystyki tranzystora npn w układzie WE: a) wejściowa, b) wyjściowa [3, s. 66, 69]

Równania prądowe i napięciowe tranzystora dla układu WE

Między napięciami i prądami zachodzą następujące relacje (rys. 85):

$$U_{CE} = U_{BE} + U_{CB}$$

$$I_E = I_B + I_C$$

Współczynnik wzmocnienia prądowego

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

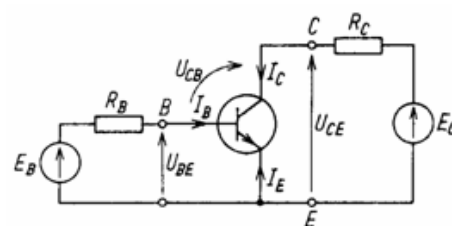
Współczynnik wzmocnienia prądowego w układzie WB

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

Między współczynnikami zachodzą zależności

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}, \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

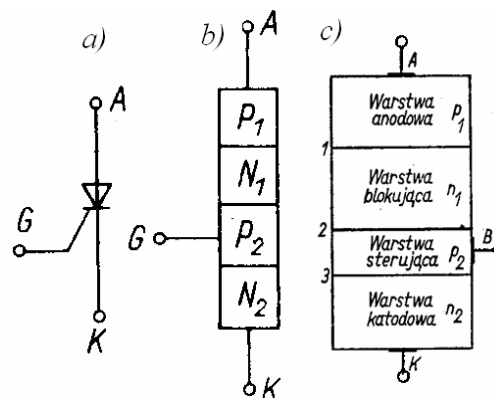
Ponieważ prąd kolektora I_C jest mniejszy od prądu emitera I_E , to $\alpha < 1$, zaś $\beta \gg 1$. Współczynnik $\alpha = 0,95 \div 0,99$, $\beta = 20 \div 1000$.



Rys. 85. Tranzystor npn w układzie WE

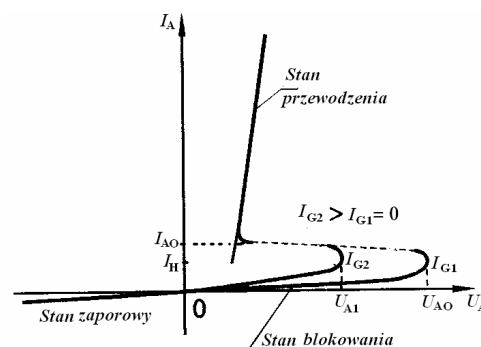
Tyrystor

Tyrystor nazywany też sterowaną diodą krzemową ma strukturę czterowarstwową typu npnp (rys. 86), tworzącą trzy złącza: $z_1 - p_1n_1$, $z_2 - n_1p_2$, $z_3 - p_2n_2$. Pierwsza warstwa p_1 jest anodą A, druga warstwa p_2 (wewnętrzna) stanowi warstwę sterującą, zwaną bramką G. Pomiedzy anodą i bramką występuje warstwa blokująca n_1 . Ostatnia warstwa n_2 jest katodą K. Jeśli napięcie anody jest ujemne względem katody, to złącze z_1 będzie spolaryzowane zaporowo, a złącze z_2 w kierunku przewodzenia. Jest to stan zaporowy tyrystora, zwany też stanem zaworowym. Jeżeli napięcie anody jest dodatnie względem katody, tyrystor zachowuje się jak dioda spolaryzowana zaporowo (tak spolaryzowane jest wówczas złącze z_2), co odpowiada stanowi blokowania. Przełączenie tyrystora ze stanu blokowania do stanu przewodzenia nazywa się załączaniem tyrystora. Może ono nastąpić, gdy napięcie anodowe przekroczy



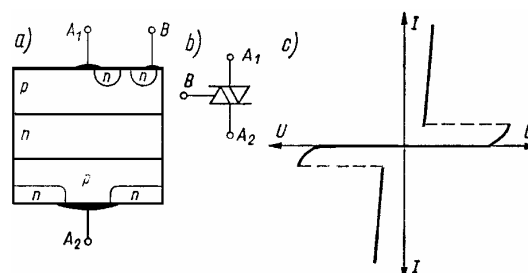
Rys. 86. Tyrystor: a) symbol, b) struktura, c) warstwy [opracowanie własne]

napięcie U_{AO} , które nazywamy napięciem przełączania a odpowiadający mu prąd I_{AO} . Najczęściej załączenie tyrystora jest wywołane przepływem prądu bramki I_G . Przejście tyrystora ze stanu przewodzenia w stan blokowania lub wsteczny, wymaga zmniejszenia prądu anodowego tyrystora do wartości prądu podtrzymania I_H albo przez zmianę polaryzacji napięcia anoda-katoda. W praktyce wykorzystuje się drugi sposób. W stanie przewodzenia, prąd w obwodzie anoda-katoda ma wartość zależną głównie od impedancji obciążenia. Spadek napięcia na tyrystorze wynosi koło 1 V. Charakterystykę prądowo-napięciową tyrystora przedstawiono na rys. 87. Jak widać z charakterystyki, jeżeli rośnie prąd bramki, napięcie przełączenia maleje.



Rys. 87. Charakterystyka prądowo-napięciowa tyrystora [opracowanie własne]

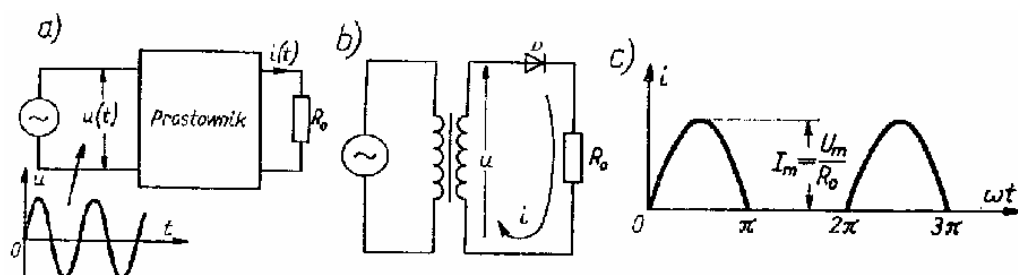
Tyrystor jako prostownik przewodzi prąd tylko w jednym kierunku. Aby można było wyzyskać jego właściwości w obwodach prądu przemiennego trzeba stosować dwa tyrystory włączone w odwrotnych kierunkach, co jest niedogodne. Duże uproszczenie takich układów daje zastosowanie elementu sterowanego przewodzącego prąd w obu kierunkach. Jest to tyrystor symetryczny, triak (rys. 88). Ma on dwie anody, a struktura wewnętrzna zapewnia połączenie pnpn dla obu kierunków. Charakterystyka tyrystora symetrycznego jest podwojoną charakterystyką tyrystora zwykłego. Obecnie produkuje się triaki na prądy od kilku do 350 A przy napięciu wstecznym do 1000 V.



Rys. 88. Triak: a) budowa, b) symbol, c) charakterystyka statyczna [opracowanie własne]

Prostowniki

Najczęściej stosowanym źródłem zasilającym jest sieć energetyczna prądu przemiennego. Zadaniem źródła zasilającego zwanego dalej zasilaczem jest dostarczenie jednego lub kilku napięć stałych. Zasilacz składa się z transformatora, prostownika jedno- lub dwupołówkowego oraz zespołu filtrów do tłumienia składowych zmiennych.



Rys. 89. Jednopołówkowy prostownik: a) schemat blokowy, b) schemat elektryczny, c) przebieg prądu na obciążeniu [opracowanie własne]

Prostownikami nazywamy układy umożliwiające przepływ jednokierunkowego prądu przez impedancję obciążenia wtedy, gdy źródło zasilania wytwarza napięcie przemienne, a więc dwukierunkowe. Rozróżniamy prostowniki niesterowane i sterowane. Na rys. 89 przedstawiono schemat blokowy prostownika niesterowanego. Dla uproszczenia, rozpatrzmy tylko przypadek obciążenia prostownika rezystancją. Układ jest zasilany napięciem przemiennym $u = U_m \sin \omega t$. Prąd płynie przez obciążenie tylko w połowie okresu napięcia

zasilającego (prostowanie jednopółwkowe), albo w całym okresie (prostowanie dwupółwkowe). Schemat układu prostowania jednopółwkowego z diodą półprzewodnikową przedstawiono na rys. 89b. Natężenie prądu płynącego przez rezystor obciążenia R_o jest równe:

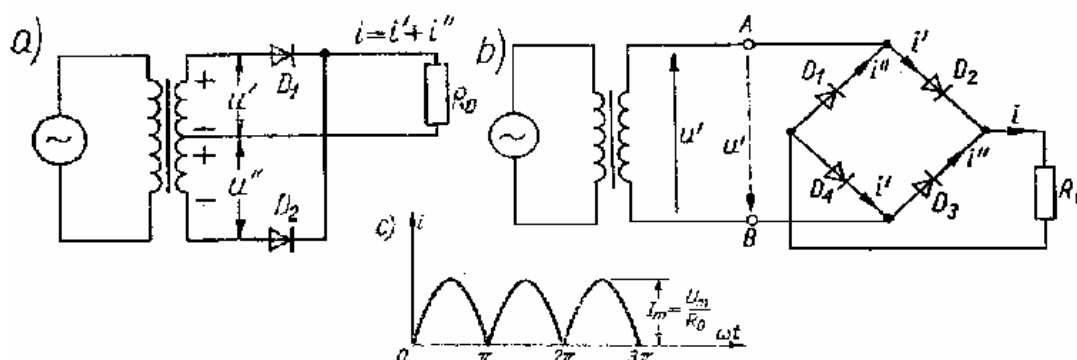
$$i = \frac{U_m \sin \omega t}{R_o}; 0 \leq \omega t \leq \pi$$

gdzie: R_o – rezystancja obciążenia, U_m – amplituda napięcia strony wtórnej transformatora.

Wykres prądu wyprostowanego pokazano na rys. 89c. Wartości prądu płynącego przez obciążenie: średnia I_o i skuteczna wynoszą odpowiednio:

$$I_o = \frac{U_m}{\pi R_o}; \quad I = \frac{U_m}{2R_o}$$

Na rysunku 90 przedstawiono schematy układów prostowania dwupółwkowego.



Rys.90. Prostowniki dwupółwkowe: a) układ z dwoma diodami, b) układ mostkowy Graetza, c) przebieg prądu na obciążeniu [opracowanie własne]

Możemy przyjąć, że prąd i składa się z dwóch składowych: $i = i' + i''$ pochodzących od napięcia u' oraz u'' . Załóżmy, że biegunowość chwilowa obu tych napięć jest taka, jak na rys. 90a. Prąd od napięcia u' płynie w obwodzie: plus napięcia u' , dioda D_1 , rezystor obciążenia R_o , minus. Dla prądu i'' obwód jest następujący: plus napięcia u'' , rezystor obciążenia R_o , dioda D_2 , minus. Dioda D_2 nie przewodzi prądu o tym kierunku przepływu, więc $i'' = 0$. W następnym półokresie napięcia zasilającego będzie: $i' = 0$ oraz $i'' \neq 0$. Kierunek prądu płynącego przez rezystor obciążenia nie ulegnie zmianie. Przez każdą z połówek uzwojenia wtórnego płynie prąd przez pół okresu. W układzie Graetza (rys. 90b) w czasie trwania napięcia u' płynie prąd i' w obwodzie: punkt A transformatora, dioda D_2 , rezystor obciążenia R_o , dioda D_4 , punkt B transformatora. Diody D_1 i D_3 nie przewodzą prądu. Po zmianie napięcia na transformatorze na przeciwne, oznaczone u'' , płynie prąd w obwodzie: punkt B, dioda D_3 , rezystor R_o , dioda D_1 , punkt A. Diody D_2 i D_4 nie przewodzą prądu. Przez uzwojenie transformatora płynie prąd w czasie obydwu półokresów napięcia zasilającego. W przypadku prostowania dwupółwkowego wartość średnia prądu wyprostowanego (rys. 90c) jest dwa razy większa niż w przypadku prostowania jednopółwkowego:

$$I_o = \frac{2U_m}{\pi R_o}$$

a wartość skuteczna

$$I = \frac{U_m}{R_o \sqrt{2}}$$

Najważniejszymi wielkościami charakteryzującymi prostownik są:

- napięcie zasilania prostownika (napięcie po stronie wtórnej transformatora),
- składowe stałe napięcia wyjściowego U_o i prądu wyjściowego I_o ,
- wartość skuteczna napięcia wyjściowego U ,
- dopuszczalny prąd wyjściowy $I_{o\max}$,

- sprawność energetyczna (mocowa) η_p , obliczona jako stosunek mocy prądu stałego na wyjściu $P_o = U_o I_o$ do mocy pozornej prądu zmiennego na wejściu prostownika $S = U I$,
- współczynnik tętnień k_t , zdefiniowany jako stosunek amplitudy składowej podstawowej tętnień na wyjściu U_{o1m} i składowej stałej U_o ,
- maksymalna wartość napięcia wstecznego U_{Rm} które występuje na elemencie prostowniczym.

Istotna jest również charakterystyka wyjściowa (obciążeniowa), czyli zależność składowej stałej napięcia wyjściowego od składowej stałej prądu wyjściowego $U_o = f(I_o)$ oraz rezystancja wyjściowa prostownika $r_{wy} = DU_o/DI_o$.

4.12.2. Pytania sprawdzające

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

1. Co to jest półprzewodnik, półprzewodnik samoistny?
2. Jakie rodzaje ładunków występują w półprzewodnikach?
3. Co to jest półprzewodnik typu n i typu p?
4. Co to jest złącze p-n?
5. Jakie właściwości posiada złącze p-n zależnie od kierunku przyłożonego napięcia?
6. Jak zbudowana jest dioda półprzewodnikowa i jak przebiega jej charakterystyka prądowo-napięciowa?
7. Jakie jest przeznaczenie i jakie parametry opisują właściwości diod prostowniczych?
8. Jaki jest symbol, przeznaczenie i charakterystyka prądowo-napięciowa diod Zenera?
9. Co to są i do czego służą diody pojemnościowe?
10. Jakie są właściwości i przeznaczenie diod elektroluminescencyjnych?
11. Jaka jest budowa tranzystorów bipolarnych npn i pnp?
12. Jakie są układy pracy tranzystora bipolarnego?
13. Jak należy polaryzować tranzystor bipolarny npn a jak pnp?
14. Na czym polega zasada działania tranzystora bipolarnego?
15. Narysuj i omów charakterystyki tranzystora bipolarnego dla układu WE?
16. Jak definiuje się współczynnik wzmocnienia prądowego β tranzystora bipolarnego?
17. Co to są prostowniki napięcia i gdzie są stosowane?
18. Jaki jest schemat i działanie prostownika półfalowego z obciążeniem rezystancyjnym?
19. Jaki jest schemat i działanie prostownika pełnofalowego z obciążeniem rezystancyjnym?

4.12.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Określ przydatność diod do użycia w układach elektronicznych przy pomocy miernika cyfrowego i analogowego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

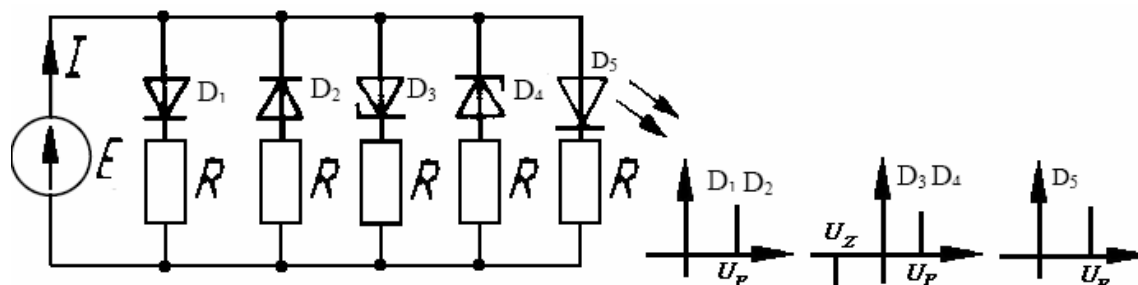
- 1) przy pomocy miernika cyfrowego z funkcją do testowania diod przeprowadzić badanie właściwości diod podanych przez nauczyciela, wybierz diody sprawne,
- 2) wykonać to samo co w p. 1 przy pomocy omomierza, zanotować wyniki i porównać z pomiarami z p. 1; zanotuj wnioski,
- 3) włączając sprawną diodę do obwodu prądu stałego złożonego z szeregowo połączonych z nią, źródła napięcia i opornika, określić sposób włączenia diody na wartość prądu płynącego w obwodzie i zanotować wyniki obserwacji.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- mierniki cyfrowe z funkcją testowania diod, omomierz analogowy, zasilacz prądu stałego, opornik suwakowy,
- diody półprzewodnikowe różnych typów, uszkodzone i sprawne,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą elementów półprzewodnikowych.

Ćwiczenie 2

W układzie przedstawionym na rysunku 1, określ rodzaje diod, ich polaryzację diod. Przyjmując, że diody mają charakterystyki jak na rys. 1, oblicz wartości prądów przepływających przez diody, prąd I płynący przez źródło i moce wydzielane w diodach. Dane: $E = 12V$, $U_{F(D1÷D4)} = 0,7V$, $U_F(D5) = 1,5V$, $U_{Z(D3,D4)} = 7,5V$, $R = 1k\Omega$.



Rysunek do ćwiczenia 2

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienś:

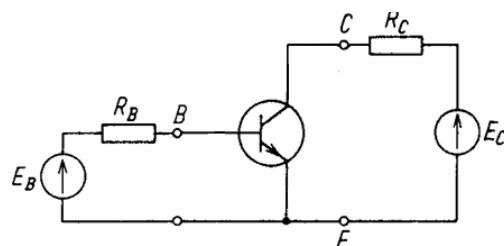
- 1) rozpoznać symbole diod oraz kierunki ich polaryzacji,
- 2) zauważyć, że na każdej gałęzi zawierającej rezystor i diodę panuje napięcie E ,
- 3) dla wyznaczenia prądów diod w gałęziach obwodów nierozgałęzionych zapisać równania II prawa Kirchhoffa zgodnie z sugestią p.2,
- 4) rozwiązać napisane równania i obliczyć wartości prądów gałęziowych i moce,
- 5) obliczyć prąd I .

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier formatu A4,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotyczącą elementów półprzewodnikowych.

Ćwiczenie 3

Dany jest układ jak na rysunku. Wyznacz wartości prądów bazy, kolektora, emitera oraz napięcia kolektor-emiter, kolektor-baza tranzystora wiedząc, że $R_B = 143 k\Omega$, $R_C = 1 k\Omega$, $E_B = E_C = 15V$, $\beta = 100$. Oblicz wartości mocy pobieranej ze źródła oraz traconej w tranzystorze.



Rysunek do ćwiczenia 3

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinien:

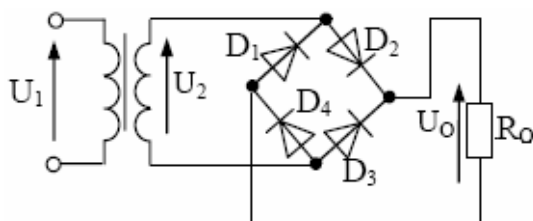
- 1) zastrzałkować prądy bazy, kolektora, emitera, napięcia U_{BE} , U_{CB} , U_{CE} , oczka,
- 2) założyć charakterystykę wejściową tranzystora jak diod D_1 i D_2 na rysunku do ćwiczenia,
- 3) obliczyć prąd bazy korzystając z prawa Ohma i z II prawa Kirchhoffa,
- 4) obliczyć z definicji współczynnika β prąd kolektora a następnie, z II prawa Kirchhoffa obliczyć napięcie U_{CE} i U_{CB} ,
- 5) obliczyć z wzoru na moc prądu stałego moce tracone w tranzystorze i pobraną ze źródła.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- papier formatu A4,
- literatura zgodna z punktem 6 poradnika, dotycząca elementów półprzewodnikowych.

Ćwiczenie 4

Przeanalizuj działanie prostownika mostkowego Graetza z obciążeniem R . Wykonaj pomiary miernikami i za pomocą oscyloskopu, zinterpretuj wyniki pomiarów.



Rysunek do ćwiczenia 4

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinien:

- 1) przeanalizować parametry katalogowe diod prostowniczych w badanym układzie: I_{Fmax} , U_F , U_{Rmax} ,
- 2) zbadać prostownik mostkowy Graetza z obciążeniem R przedstawiony na rysunku,
 - zestawić układ pomiarowy prostownika,
 - wykonać pomiary za pomocą mierników i zanotować wartości napięć i prądu w układzie: $U_2 = \dots\dots$, $U_o = \dots\dots$, $I_o = \dots\dots$,
 - zanotować oscylogramy napięć: $u_2(t)$, $u_o(t)$; zanotować zapisać wartości amplitudy napięć oraz wartości czasów przewodzenia diod prostownika,
 - odczytać z przebiegów oglądanych na oscyloskopie wartości maksymalną i średnią napięcia i prądu wyprostowanego i porównać z wartościami zmierzonymi; omówić ewentualne różnice.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- transformator sieciowy 230V/12V,
- diody do zmontowania mostka Graetza przewodami,
- mierniki AC, DC, oscyloskop,
- przewody do wykonywania połączeń,
- papier formatu A4,
- katalogi z diodami prostowniczymi.

4.12.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyjaśnić pojęcia półprzewodnik, półprzewodnik samoistny?	☐	☐
2) wyjaśnić pojęcia półprzewodnik typu n i typu p?	☐	☐
3) określić rodzaje ładunków występujących w półprzewodnikach?	☐	☐
4) określić własności złącza p-n w zależności od kierunku polaryzacji napięcia?	☐	☐
5) opisać budowę diody półprzewodnikowej i przebieg jej charakterystyki?	☐	☐
6) określić przeznaczenie i parametry diod prostowniczych?	☐	☐
7) określić symbol, przeznaczenie i charakterystyki I(U) diod Zenera?	☐	☐
8) określić do czego służą diody pojemnościowe?	☐	☐
9) określić właściwości i przeznaczenie diod elektroluminescencyjnych?	☐	☐
10) określić układy pracy tranzystora bipolarnego?	☐	☐
11) wyjaśnić zasady działania tranzystora bipolarnego?	☐	☐
12) spolaryzować tranzystor bipolarny dla normalnej pracy?	☐	☐
13) narysować i wyjaśnić charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego dla układu WE?	☐	☐
14) zmierzyć współczynnik β tranzystora bipolarnego w układzie WE?	☐	☐
15) wyjaśnić pojęcie prostownik,?	☐	☐
16) narysować przebiegi czasowe napięcia w prostowniku półfalowym i pełnofalowym z obciążeniu rezystancyjnym?	☐	☐
17) określić funkcję transformatora, diody, rezystora w układach prostownikowych?	☐	☐

5. SPRAWDZIAN OSIĄGNIĘĆ

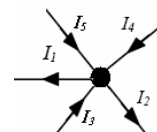
INSTRUKCJA DLA UCZNIA

1. Przeczytaj uważnie instrukcję.
2. Podpisz imieniem i nazwiskiem kartę odpowiedzi.
3. Zapoznaj się z zestawem zadań testowych.
4. Test zawiera 30 zadań. Do każdego zadania dołączone są 4 możliwości odpowiedzi. Tylko jedna jest prawidłowa.
5. Udzielaj odpowiedzi na załączonej karcie odpowiedzi, stawiając w odpowiedniej rubryce znak X. W przypadku pomyłki należy błędną odpowiedź zaznaczyć kółkiem, a następnie ponownie zakreślić odpowiedź prawidłową.
6. Zadania wymagają stosunkowo prostych obliczeń, które powinieneś wykonać przed wskazaniem poprawnego wyniku.
7. Pracuj samodzielnie, bo tylko wtedy będziesz miał satysfakcję z wykonanego zadania.
8. Jeśli udzielenie odpowiedzi będzie Ci sprawiało trudność, wtedy odłóż jego rozwiązanie na później i wróć do niego, gdy zostanie Ci wolny czas.
9. Na rozwiązanie testu masz 40 minut.

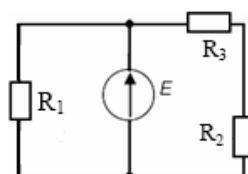
Powodzenia!

ZESTAW ZADAŃ TESTOWYCH

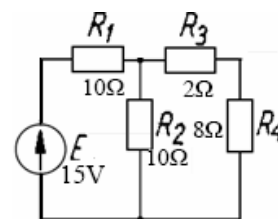
1. Na rysunku pokazano węzeł obwodu elektrycznego. Wartości prądów wynoszą $I_1 = 1\text{ A}$, $I_3 = 2\text{ A}$, $I_4 = 3\text{ A}$. $I_5 = 4\text{ A}$. Prąd I_2 jest równy
 - a) 8 A.
 - b) 9 A.
 - c) 7 A.
 - d) 5 A.



2. W obwodzie przedstawionym na rysunku elementy elektryczne mają wartości: $E = 60\text{ V}$, $R_1 = 30\ \Omega$, $R_2 = 20\ \Omega$, $R_3 = 40\ \Omega$. Wartości prądów w gałęziach obwodu wynoszą
 - a) 3 A; 1 A; 2 A.
 - b) 2 A; 1 A; 3 A.
 - c) 7 A; 2 A; 5 A.
 - d) 5 A; 1 A; 4 A.

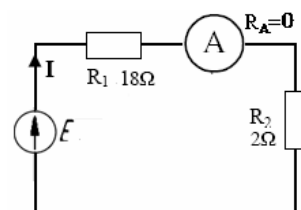


3. Rezystancja zastępcza dołączona do zacisków źródła E w układzie jak na rysunku wynosi
 - a) $50\ \Omega$.
 - b) $25\ \Omega$.
 - c) $15\ \Omega$.
 - d) $8\ \Omega$.
4. Wartość prądu płynącego przez rezystor R_3 w układzie przedstawionym na rysunku w pytaniu 3 wynosi
 - a) 0,2 A.
 - b) 0,5 A.
 - c) 0,8 A.
 - d) 1,1 A.



5. W obwodzie na rysunku amperomierz wskazuje prąd $I = 0,5 \text{ A}$. Wartość napięcia źródłowego E wynosi

a) 10 V.
b) 12 V.
c) 15 V.
d) 17 V.



6. W obwodzie na rysunku jak w zadaniu 5 napięcie źródłowe $E = 40 \text{ V}$. Moc wydzielana na rezystorze R_1 wynosi

a) 58 W.
b) 62 W.
c) 66 W.
d) 72 W.

7. Aby wskazanie amperomierza zmalało dwukrotnie rezystor należy włączyć szeregowo w obwód z zadania 5 o wartości

a) 15 Ω .
b) 18 Ω .
c) 20 Ω .
d) 22 Ω .

8. W obwodzie szeregowym płynie prąd $i(t) = 28,2 \sin(314t)$. Wartość skuteczna prądu i jego częstotliwość wynoszą

a) 16 A, 314 Hz.
b) 20 A, 50 Hz.
c) 20 A, 314 Hz.
d) 16 A, 50 Hz.

9. Wartość skuteczna napięcia źródła wynosi $U = 230 \text{ V}$, prąd płynący w obwodzie $i = 14,2 \sin(314t)$. Kąt przesunięcia fazowego między prądem a napięciem wynosi $\varphi = 0^\circ$. Moce, czynna, bierna i pozorna mają wartości

a) 1300 W, 0 var, 2200 VA.
b) 0 W, 4600 var, 4600 VA.
c) 0 W, -2300 var, 2300 VA.
d) 4600 W, 0 var, 4600 VA.

10. Wartość skuteczna napięcia o częstotliwości $f = 50 \text{ Hz}$ na cewce indukcyjnej o indukcyjności $L = 0,5 \text{ H}$, wynosi $U = 230 \text{ V}$. Prąd płynący przez cewkę i jej reaktancja wynoszą

a) 1,46 A, 157 Ω .
b) 1,66 A, 166 Ω .
c) 1,88 A, 175 Ω .
d) 1,98 A, 181 Ω .

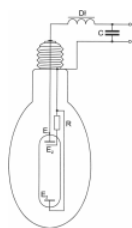
11. Liczba zwojów uzwojenia pierwotnego transformatora 1-fazowego $z_1 = 1200$ a napięcie $U_1 = 230 \text{ V}$. Aby napięcie $U_2 = 24 \text{ V}$ to uzwojenie wtórne musi mieć liczbę zwojów

a) 69.
b) 89.
c) 118.
d) 125.

12. W obwodzie szeregowym RLC, $R = 60 \Omega$, $X_L = 180 \Omega$, $X_C = 100 \Omega$, płynie prąd, którego wartość skuteczna $I = 2 \text{ A}$. Wartość skuteczna napięcia U zasilającego układ wynosi
- 120 V.
 - 140 V.
 - 170 V.
 - 200 V.
13. Trzy grzałki o jednakowych rezystancjach $R = 100 \Omega$ połączone w gwiazdę i zasilono z sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym $U = 400 \text{ V}$. Wartość prądu w jednej grzałce i całkowita moc pobrana przez grzałki mają wartości
- 3,4 A, 2,8 kW.
 - 2,8 A, 4,8 kW.
 - 2,3 A, 1,6 kW.
 - 5,1 A, 3,9 kW.
14. W układzie przedstawionym na rysunku wskazania przyrządów są następujące $P = 80 \text{ W}$, $U = 50 \text{ V}$, $I = 2 \text{ A}$. Moc bierna układu wynosi
- 80 var.
 - 120 var.
 - 90 var.
 - 60 var.

15. Na rysunku pokazano

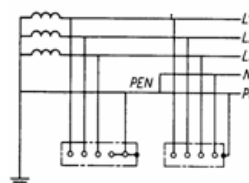
- ręciówkę.
- światłówkę.
- żarówkę.
- sodówkę.



16. Żarówka o mocy $P = 100 \text{ W}$, napięciu znamionowym $U = 230 \text{ V}$ ma rezystancję na gorąco
- 236 Ω .
 - 384 Ω .
 - 529 Ω .
 - 489 Ω .

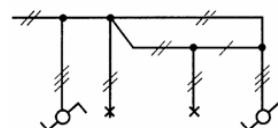
17. Na rysunku pokazany jest układ zasilania sieci nn typu

- TT.
- TN-C-S.
- TN-C.
- TN-S.

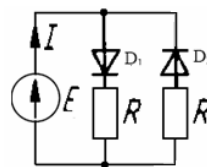


18. Na rysunku pokazany jest układ sterowania oświetleniem przy użyciu

- dwóch łączników jednobiegunowych.
- dwóch łączników świecznikowych.
- łącznika krzyżowego i schodowego.
- dwóch łączników schodowych.



19. Wartość prądu różnicowego wyłącznika różnicowoprądowego stosowanego jako ochrona przeciwporażeniowa wynosi
- 15 mA.
 - 50 mA.
 - 30 mA.
 - 100 mA.
20. Wartości maksymalna i średnia napięcia na obciążeniu rezystancyjnym ($R = 150 \Omega$) prostownika półfalowego zasilanego z sieci o $U=230 \text{ V}$ przez transformator o liczbie zwojów $z_1=2300$, $z_2=230$ wynosi
- 32 V, 10 V.
 - 10 V, 32 V.
 - 32 V, 16 V.
 - 16 V, 32 V.
21. Wartości średnia i skuteczna prądu w obciążeniu rezystancyjnym ($R = 20 \Omega$) prostownika w układzie Graetza, zasilanego z sieci jednofazowej o $U=230 \text{ V}$ przez transformator o przekładni napięciowej $n_u = 5$ wnoszą
- 2 A, 2,3 A.
 - 2,3 A, 2 A.
 - 2,6 A, 2,3 A.
 - 2,3 A, 2,6 A.
22. Dioda Zenera pokazana jest na rysunku
- 
 - 
 - 
 - 
23. W przedstawionym na rysunku obwodzie diody
- dioda D_1 jest zatkana, D_2 jest zatkana.
 - dioda D_1 jest zatkana, D_2 przewodzi.
 - diody D_1 , D_2 przewodzą.
 - dioda D_1 przewodzi, D_2 jest zatkana.



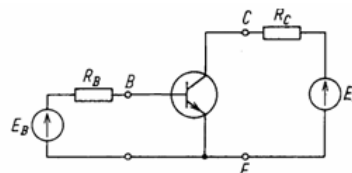
24. W obwodzie przedstawionym w zadaniu 23 $E = 12 \text{ V}$, spadek napięcia na diodach przewodzenia $U_{F(D1, D2)} = 0,7 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$. Prąd I ma wartość
- 8 mA.
 - 14 mA.
 - 11 mA.
 - 16 mA.

25. Rezystor należy włączyć szeregowo z diodą elektroluminescencyjną o $U_F = 2,5 \text{ V}$, aby przy napięciu zasilającym układ $U = 24 \text{ V}$ prąd płynący w obwodzie miał wartość $I_F = 10 \text{ mA}$

a) 50Ω .
b) 100Ω .
c) 150Ω .
d) 200Ω .

26. W układzie przedstawionym na schemacie. $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $E_B = E_C = 12 \text{ V}$, $\beta = 100$. Wartości prądów bazy i kolektora mają wartości (przyjmując $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$)

a) $113 \mu\text{A}$, $11,3 \text{ mA}$.
b) $98 \mu\text{A}$, $9,8 \text{ mA}$.
c) $135 \mu\text{A}$, $13,5 \text{ mA}$.
d) $150 \mu\text{A}$, 15 mA .



27. W układzie wzmacniacza przedstawionym w zadaniu 26 $R_B = 200 \text{ k}\Omega$, $R_C = 0,5 \text{ k}\Omega$, $E_B = E_C = 24 \text{ V}$, $\beta = 100$, $U_{EB} = 0,7 \text{ V}$. Wartość mocy pobieranej ze źródła E_C wynosi

a) 458 mW .
b) 279 mW .
c) 800 mW .
d) $1,2 \text{ W}$.

28. W układzie wzmacniacza przedstawionym w zadaniu 26 $R_B = 1000 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $E_B = E_C = 24 \text{ V}$, $\beta = 100$, $U_{EB} = 0,7 \text{ V}$. Stosunek napięć U_{CE}/U_{BE} wynosi

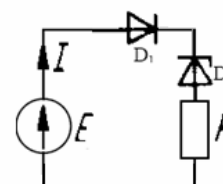
a) 31.
b) 28.
c) 37.
d) 41.

29. Prąd bazy tranzystora wynosi $100 \mu\text{A}$, współczynnik wzmocnienia prądowego β . Prąd emitera wynosi

a) $11,9 \text{ mA}$.
b) $9,3 \text{ mA}$.
c) $7,8 \text{ mA}$.
d) $5,1 \text{ mA}$.

30. W układzie pokazanym na rysunku napięcie $U_{F(D1,D2)} = 0,7 \text{ V}$, $U_{D2} = 5,6 \text{ V}$, $E = 12 \text{ V}$, $R = 100 \Omega$. Prąd płynący w obwodzie ma wartość

a) $0,12 \text{ A}$.
b) $0,057 \text{ A}$.
c) $0,145 \text{ A}$.
d) $0,075 \text{ A}$.



KARTA ODPOWIEDZI

Imię i nazwisko

Badanie układów elektrycznych i elektronicznych

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	
21.	a	b	c	d	
22.	a	b	c	d	
23.	a	b	c	d	
24.	a	b	c	d	
25.	a	b	c	d	
26.	a	b	c	d	
27.	a	b	c	d	
28.	a	b	c	d	
29.	a	b	c	d	
30.	a	b	c	d	
Razem:					

6. LITERATURA

1. Bolkowski S.: Elektrotechnika. WSiP, Warszawa 1995
2. Chochowski A.: Elektrotechnika z automatyką. WSiP, Warszawa 1996
3. Chwaleba A., Moeschke B., Płoszajski G.: Elektronika. WSiP, Warszawa 2004
4. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna. WNT, Warszawa 2000
5. Jabłoński W., Płoszajski G.: Elektrotechnika z automatyką. WSiP, Warszawa 1999
6. Markiewicz A.: Zbiór zadań z elektrotechniki. WSiP, Warszawa 1995
7. Marusak A.: Urządzenia elektroniczne. WSiP, Warszawa 2000
8. Olszewski M.: Podstawy mechatroniki. REA, Warszawa 2006
9. Pilawski M.: Pracownia elektryczna. WSiP, Warszawa 1995

Czasopisma:

- Elektronika dla wszystkich
- Elektronika
- Elektroinstalator