

6



# ELEKTRYK

**Obliczanie i pomiary parametrów  
obwodu prądu trójfazowego**



MINISTERSTWO EDUKACJI  
NARODOWEJ



**Teresa Birecka**

## **Obliczanie i pomiary parametrów obwodu prądu trójfazowego 724[01].O1.06**

**Poradnik dla ucznia**

**Wydawca**

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

Recenzenci:

mgr inż. Henryk Krystkowiak  
mgr Stanisław Rogulski

Opracowanie redakcyjne:

mgr inż. Barbara Kapruziak

Konsultacja:

mgr inż. Ryszard Dolata

Poradnik stanowi obudowę dydaktyczną programu jednostki modułowej 724[01].O1.06 „Obliczanie i pomiary parametrów obwodu prądu trójfazowego”, zawartego w modułowym programie nauczania dla zawodu elektryk.

Wydawca

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2007

# SPIS TREŚCI

<b>1. Wprowadzenie</b>	3
<b>2. Wymagania wstępne</b>	5
<b>3. Cele kształcenia</b>	6
<b>4. Materiał nauczania</b>	7
<b>4.1. Wytwarzanie napięć przemiennych trójfazowych. Podstawowe wielkości w układach trójfazowych</b>	7
4.1.1. Materiał nauczania	7
4.1.2. Pytania sprawdzające	12
4.1.3. Ćwiczenia	12
4.1.4. Sprawdzian postępów	14
<b>4.2. Łączenie odbiorników trójfazowych</b>	15
4.2.1. Materiał nauczania	15
4.2.2. Pytania sprawdzające	22
4.2.3. Ćwiczenia	22
4.2.4. Sprawdzian postępów	26
<b>4.3. Moc w układach trójfazowych. Poprawa współczynnika mocy</b>	27
4.3.1. Materiał nauczania	27
4.3.2. Pytania sprawdzające	29
4.3.3. Ćwiczenia	30
4.3.4. Sprawdzian postępów	32
<b>4.4. Pomiar mocy w układach trójfazowych</b>	33
4.4.1. Materiał nauczania	33
4.4.2. Pytania sprawdzające	37
4.4.3. Ćwiczenia	38
4.4.4. Sprawdzian postępów	42
<b>4.5. Pomiar energii elektrycznej w układach trójfazowych</b>	43
4.5.1. Materiał nauczania	43
4.5.2. Pytania sprawdzające	44
4.5.3. Ćwiczenia	44
4.5.4. Sprawdzian postępów	45
<b>5. Sprawdzian osiągnięć</b>	47
<b>6. Literatura</b>	53

# 1. WPROWADZENIE

Poradnik będzie Ci pomocny w kształtowaniu umiejętności z zakresu obliczania i pomiarów w układach trójfazowych.

W poradniku zamieszczono:

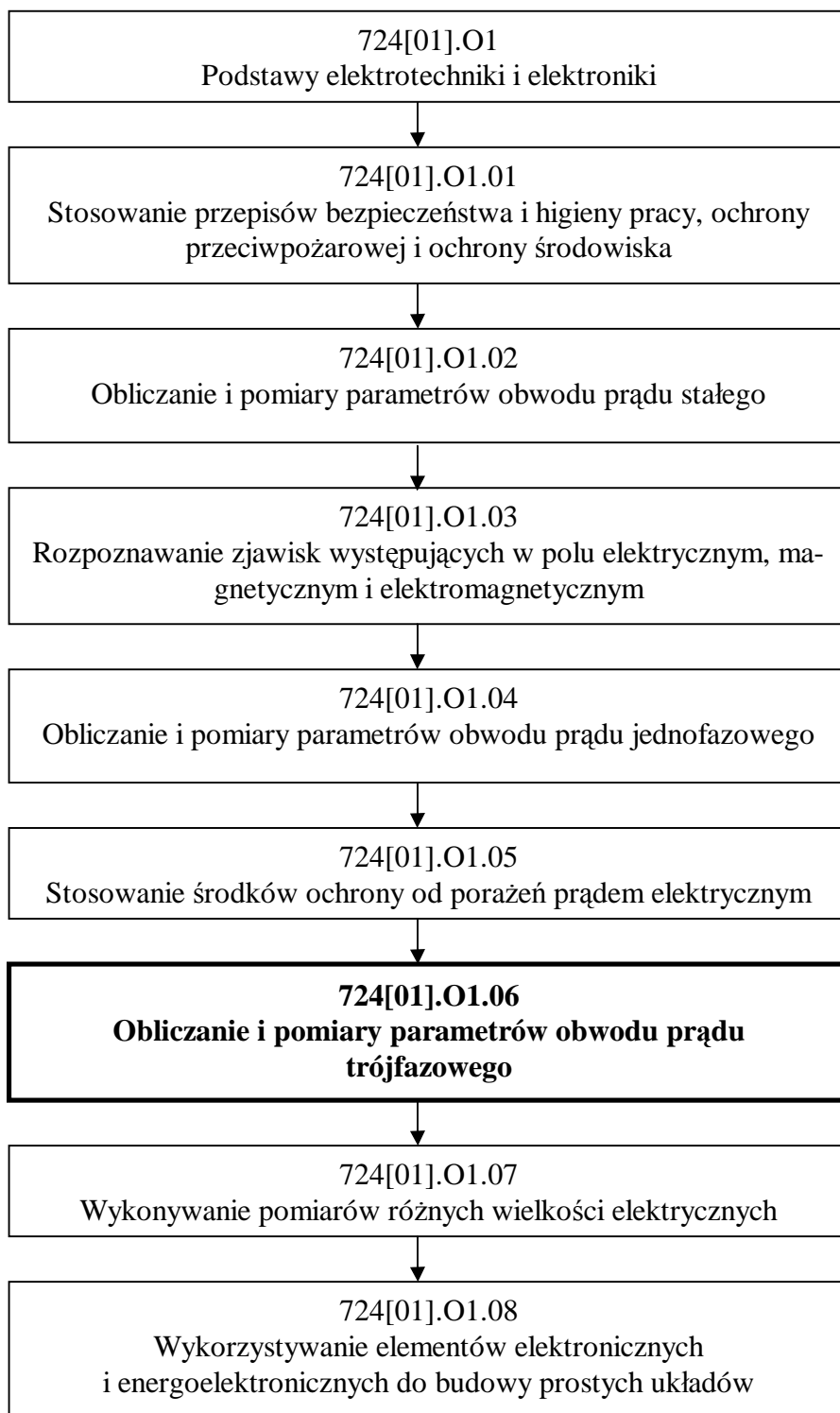
- wymagania wstępne: wykaz umiejętności, jakie powinieneś mieć już opanowane, abyś bez problemów mógł korzystać z poradnika,
- cele kształcenia: wykaz umiejętności, jakie ukształtujesz podczas pracy z podręcznikiem; osiągnięcie celów kształcenia określonych dla tej jednostki modułowej jest warunkiem koniecznym do zrozumienia i przyswojenia treści zawartych w programach następnych modułów,
- materiał nauczania: zawiera „pigułkę” wiadomości teoretycznych niezbędnych do osiągnięcia celów kształcenia zawartych w tej jednostce modułowej; materiał nauczania dotyczący tej jednostki modułowej został podzielony na pięć części (rozdziałów) obejmujących grupy zagadnień, które można wyodrębnić; każdy rozdział zawiera:
  - pytania sprawdzające: zestaw pytań przydatny do sprawdzenia, czy już opanowałeś podane treści,
  - ćwiczenia: pomogą ci zweryfikować wiadomości teoretyczne oraz ukształtować umiejętności praktyczne,
  - sprawdzian postępów: pozwoli ci na dokonanie samooceny wiedzy po wykonaniu ćwiczeń.
- sprawdzian osiągnięć: umożliwi sprawdzenie twoich wiadomości i umiejętności, które opanowałeś podczas realizacji programu tej jednostki modułowej,
- wykaz literatury: wymieniona tutaj literatura zawiera pełne treści materiału nauczania i korzystając z niej pogłębisz wiedzę z zakresu programu jednostki modułowej; na końcu każdego rozdziału podano pozycję literatury, którą wykorzystano przy jego opracowywaniu.

Szczególne uwagę zwróć na zrozumienie zależności pomiędzy wielkościami fazowymi i międzyfazowymi, bowiem występują one zarówno w źródłach energii, liniach przesyłowych, i odbiornikach, z którymi będziesz miał do czynienia w toku nauki i w pracy zawodowej.

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

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

Przy wykonywaniu ćwiczeń praktycznych postępuj zgodnie z poznanymi wcześniej zasadami bezpieczeństwa.



Schemat układu jednostek modułowych

## 2. WYMAGANIA WSTĘPNE

Przystępując do realizacji programu jednostki modułowej powinieneś umieć:

- charakteryzować zjawisko indukcji elektromagnetycznej,
- rozróżniać podstawowe parametry przebiegu sinusoidalnego,
- rozróżniać podstawowe wielkości elektryczne prądu przemiennego i ich jednostki,
- stosować działania na wektorach,
- konstruować i interpretować wykresy wektorowe dla obwodów zawierających  $R$ ,  $L$  i  $C$ ,
- rysować trójkąty impedancji oraz obliczać moduły impedancji,
- obliczać prądy, napięcia i moce w obwodach prądu sinusoidalnego,
- łączyć obwody elektryczne prądu przemiennego na podstawie ich schematów,
- dobierać przyrządy pomiarowe do pomiarów w obwodach prądu jednofazowego,
- mierzyć podstawowe wielkości elektryczne w obwodach prądu jednofazowego,
- lokalizować i usuwać proste usterki w obwodach prądu przemiennego,
- oceniać niebezpieczeństwo wystąpienia zagrożenia porażeniem prądem elektrycznym,
- rozpoznawać środki ochrony od porażenia prądem elektrycznym,
- stosować odpowiedni do warunków środki ochrony od porażenia prądem elektrycznym,
- montować zgodnie ze schematem elektrycznym różne rodzaje zabezpieczeń,
- stosować zasady bhp i ochrony ppoż. podczas pomiarów oraz pokazów zjawisk fizycznych.

### 3. CELE KSZTAŁCENIA

W wyniku realizacji programu jednostki modułowej powinieneś umieć:

- wyjaśnić zasadę powstawania napięć sinusoidalnie zmiennych w prądniczy trójfazowej,
- połączyć odbiornik trójfazowy w gwiazdę i w trójkąt,
- rozróżnić pojęcia: napięcie fazowe i międzyfazowe oraz prąd fazowy i przewodowy
- obliczyć moc i energię odbiornika trójfazowego symetrycznego oraz niesymetrycznego,
- dobrać zakres pomiarowy mierników do pomiaru podstawowych wielkości elektrycznych w obwodach prądu trójfazowego,
- połączyć dowolny obwód trójfazowy na podstawie schematu elektrycznego,
- zmierzyć prąd fazowy i przewodowy, napięcie fazowe i międzyfazowe, moc bierną, czynną i pozorną oraz energię w obwodzie trójfazowym,
- podłączyć odbiorniki trójfazowe do sieci typu TN–C, TN–S, TT, IT,
- zlokalizować na podstawie wyników pomiarów usterki w obwodzie prądu trójfazowego,
- wykonać proste naprawy w obwodzie prądu trójfazowego,
- zastosować zasady bezpieczeństwa i higieny pracy oraz ochrony od porażeń prądem elektrycznym, ochrony przeciwpożarowej obowiązujące na stanowisku pracy.



## 4. MATERIAŁ NAUCZANIA

### 4.1. Wytwarzanie napięć przemiennych trójfazowych. Podstawowe wielkości w układach trójfazowych

#### 4.1.1. Materiał nauczania

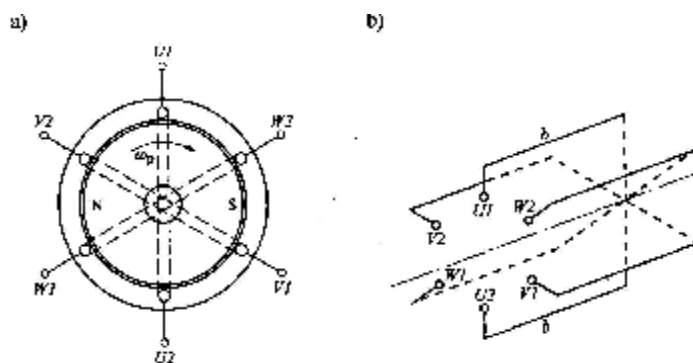
Układ trzech napięć źródłowych o jednakowej częstotliwości, czyli synchronicznych, przesuniętych względem siebie w fazie, nazywamy układem trójfazowym.

Układ trójfazowy symetryczny jest to układ napięć źródłowych sinusoidalnych o jednakowej częstotliwości, o jednakowych wartościach skutecznych (oraz amplitudach), przesuniętych kolejno w fazie co  $2\pi/3$  rad ( $120^\circ$ ).

Układy trójfazowe są powszechnie stosowane w elektroenergetyce ze względu na ekonomikę i łatwość wytwarzania, przesyłania i rozdziału energii elektrycznej oraz jej zamianę w energię mechaniczną.

Do wytwarzania napięć w układzie trójfazowym służą prądnice (generatory) trójfazowe. W prądnicie trójfazowej wyróżniamy stojan (stator) i wirnik (rotor) pełniący rolę magneśnicy i wirujący ze stałą prędkością kątową  $\omega$ . Magneśnice prądnic napędzanych turbinami parowymi mają kształt walców o uzwojeniach umieszczonych w żłobkach i tak dobranych, aby otrzymać sinusoidalny rozkład indukcji w szczeliny magnetycznej wzdłuż obwodu. Na stojanie prądnicy dwubiegunowej znajdują się trzy jednakowe uzwojenia, przesunięte względem siebie kolejno na obwodzie co  $2\pi/3$  rad ( $120^\circ$ ). Uzwojenia składają się z szeregowo połączonych zwojów. Boki (pręty) każdego zwoju znajdują się w dwóch przeciwległych żłobkach.

W praktyce poszczególne uzwojenia prądnicy trójfazowej nazywa się po prostu fazami prądnicy.



Rys. 1. Uproszczony model prądnicy trójfazowej [1]

Początki uzwojeń oznaczamy literami  $U1$ ,  $V1$ ,  $W1$ , a końce  $U2$ ,  $V2$ ,  $W2$ .

Podczas ruchu magneśnicy ze stałą prędkością kątową  $\omega$  w uzwojeniach indukują się siły elektromotoryczne (napięcia źródłowe) sinusoidalne:

- o jednakowej częstotliwości, ze względu na wspólną magneśnicę,
- o jednakowych amplitudach  $E_m$  (i wartościach skutecznych), bo uzwojenia poszczególnych faz są identyczne,
- o fazach przesuniętych co  $2\pi/3$  rad ( $120^\circ$ ), z uwagi na rozmieszczenie uzwojeń na stojanie.

Jedną z faz prądnicy przyjmujemy jako podstawową i względem napięcia źródłowego tej fazy określamy napięcia w fazach pozostałych.

Wartości chwilowe sił elektromotorycznych indukowanych w poszczególnych fazach symetrycznego źródła trójfazowego (prądnicy) opisuje układ równań:

$$e_U = E_m \sin \omega t$$

$$e_V = E_m \sin(\omega t - 2p/3)$$

$$e_W = E_m \sin(\omega t - 4p/3)$$

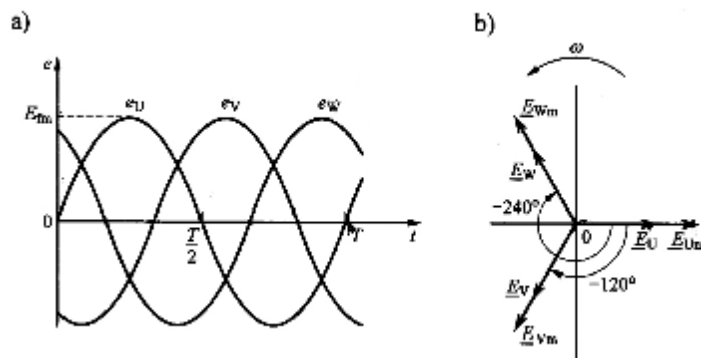
$E_m$  – amplitudy sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach każdej fazy.

W każdej chwili suma wartości chwilowych sił elektromotorycznych jest równa zero:

$$e_U + e_V + e_W = 0$$

Również suma wektorów wartości skutecznych (a także wektorów amplitud) jest równa zero:

$$\underline{E}_U + \underline{E}_V + \underline{E}_W = 0$$

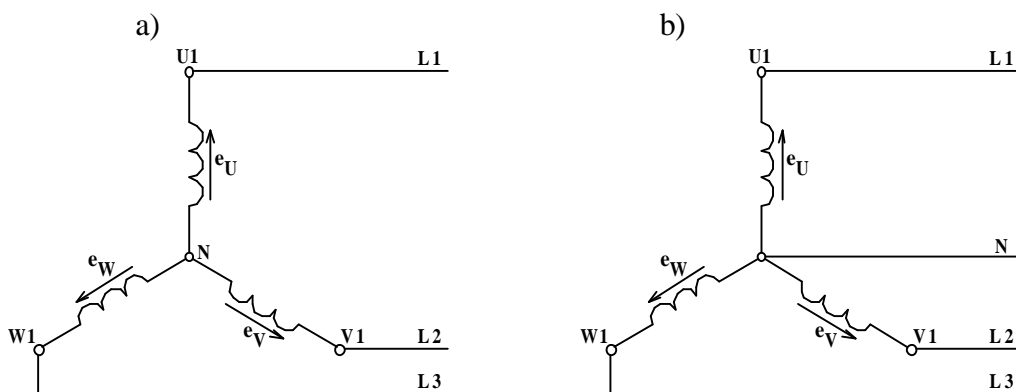


**Rys. 2.** Siły elektromotoryczne w prądnicy trójfazowej symetrycznej: a) przebiegi w czasie; b) wykres wektorowy dla wartości skutecznych i amplitud [2]

Uzwojenia (fazy) prądnicy trójfazowej mogą być połączone w gwiazdę lub w trójkąt.

### Układ połączeń uzwojeń prądnicy w gwiazdę

Układ połączeń w gwiazdę może być trójprzewodowy (stosowany w prądnicach wysokiego napięcia) lub czteroprzewodowy (rys. 3).



**Rys. 3.** Układ połączeń uzwojeń prądnicy w gwiazdę: a) trójprzewodowy; b) czteroprzewodowy [2]

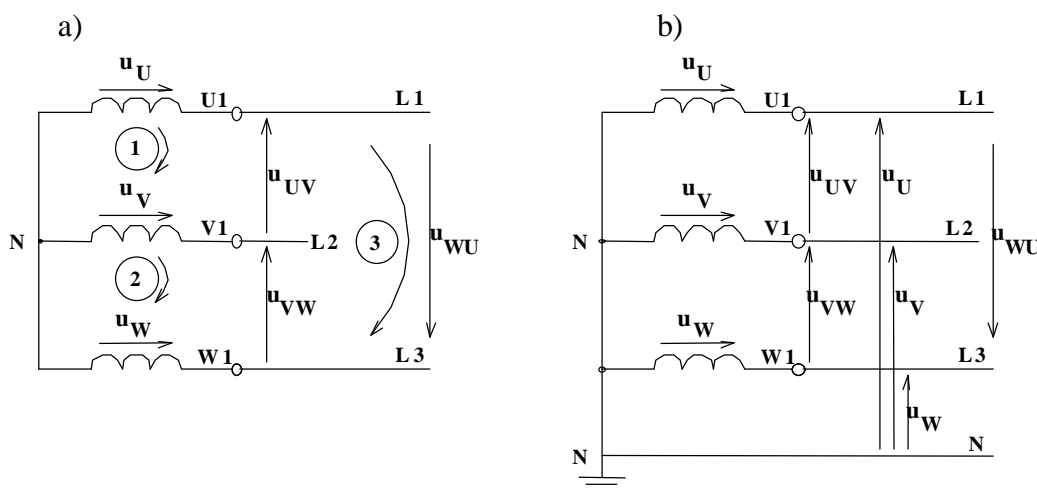
Przewód połączony z uziemionym punktem neutralnym nazywamy przewodem neutralnym układu i oznaczamy literą N. Pozostałe trzy przewody nazywamy przewodami fazowymi i oznaczamy je przez L1, L2, L3.

Napięcia między dwoma dowolnymi przewodami fazowymi nazywamy napięciami międzyfazowymi i oznaczamy je:  $u_{UV}, u_{VW}, u_{WU}$  (wartości chwilowe) lub:  $U_{UV}, U_{VW}, U_{WU}$  – wartości skuteczne.

Napięcia między dowolnym przewodem fazowym, a punktem neutralnym nazywamy napięciami fazowymi i oznaczamy je przez:  $u_U, u_V, u_W$  – wartości chwilowe oraz  $U_U, U_V, U_W$  – wartości skuteczne.

Jeżeli układ gwiazdowy nie jest obciążony, to napięcia fazowe są równe siłom elektromotorycznym indukowanym w poszczególnych fazach prądnicy:

$$u_U = e_U, \quad u_V = e_V, \quad u_W = e_W$$



**Rys. 4.** Powszechnie stosowany sposób rysowania układu połączeń w gwiazdę: a) trójprzewodowego, b) czteroprzewodowego [2]

Stosując drugie praw Kirchhoffa można ułożyć dla oczek obwodu na rys. 4 równania:

$$\text{Oczko 1: } u_U - u_{UV} - u_V = 0, \quad \text{stąd: } u_{UV} = u_U - u_V$$

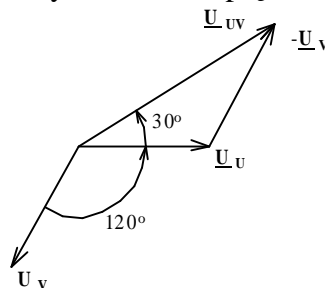
$$\text{Oczko 2: } u_V - u_{VW} - u_W = 0, \quad \text{stąd: } u_{VW} = u_V - u_W$$

$$\text{Oczko 3: } u_U + u_{WU} - u_W = 0, \quad \text{stąd: } u_{WU} = u_W - u_U$$

Z powyższego wynika, że wartość chwilowa dowolnego napięcia międzyfazowego jest równa różnicy algebraicznej wartości chwilowych odpowiednich napięć fazowych.

Odejmowaniu wartości chwilowych napięć sinusoidalnych o jednakowej pulsacji  $\omega$  odpowiada odejmowanie opisujących je wektorów.

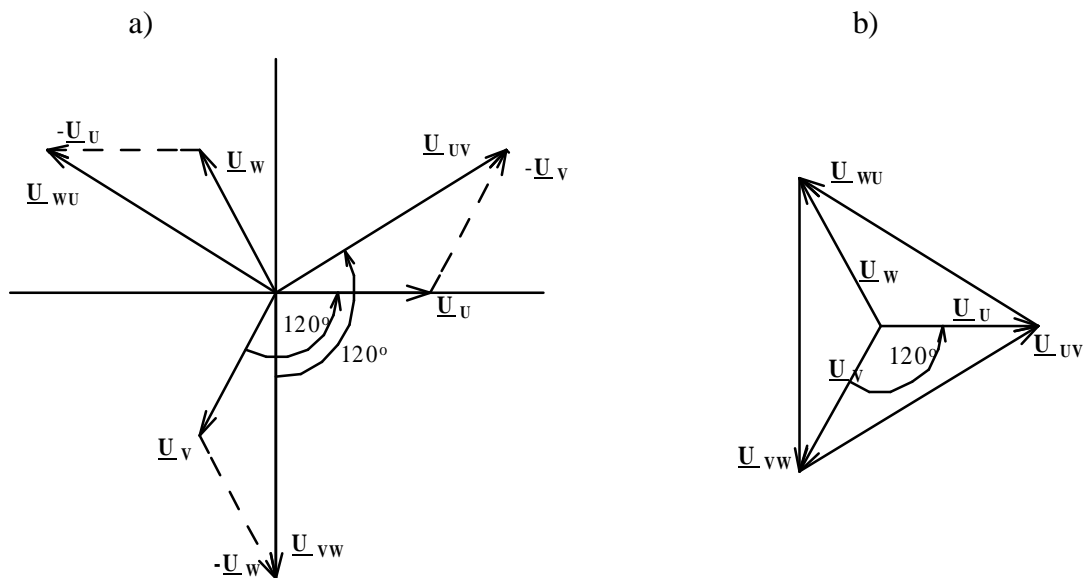
Na rys. 5 pokazany jest sposób wyznaczania napięcia międzyfazowego.



**Rys. 5.** Wyznaczanie napięcia międzyfazowego w układzie gwiazdowym [2]

Na rys. 6.a przedstawiono układ trzech napięć fazowych o jednakowych wartościach skutecznych oraz wektory napięć międzyfazowych, które otrzymujemy z zależności:

$$\underline{U}_{UV} = \underline{U}_U - \underline{U}_V = \underline{U}_U + (-\underline{U}_V) \quad \underline{U}_{VW} = \underline{U}_V + (-\underline{U}_W) \quad \underline{U}_{WU} = \underline{U}_W + (-\underline{U}_U)$$



**Rys 6.** Wykres wektorowy napięć fazowych i międzyfazowych: a) przedstawienie działania na wektorach, b) powszechny sposób rysowania wektorów napięć fazowych i międzyfazowych [2]

Wektory napięć fazowych  $\underline{U}_U$ ,  $\underline{U}_V$ , i  $\underline{U}_W$  tworzą układ symetryczny napięć o jednakowych wartościach skutecznych, przesuniętych względem siebie kolejno o kąt  $120^\circ$ . **Wartości skuteczne napięć fazowych** w układzie trójfazowym symetrycznym są sobie równe i oznaczamy je  $U_f$ .

Również wektory napięć międzyfazowych  $\underline{U}_{UV}$ ,  $\underline{U}_{VW}$  i  $\underline{U}_{WU}$  tworzą układ symetryczny o jednakowych wartościach skutecznych, przesuniętych względem siebie kolejno o kąt  $120^\circ$ . **Wartości skuteczne napięć międzyfazowych** w układzie symetrycznym są sobie równe i oznaczamy je  $U$  (spotyka się także oznaczenie  $U_p$ ).

Przesuwając równolegle wektory napięć międzyfazowych (bez zmiany ich kierunku, zwrotu i długości) otrzymujemy trójkąt napięć międzyfazowych, którego wierzchołki wyznaczone są przez wektory napięć fazowych (rys. 6.b). Dwa kolejne napięcia fazowe i odpowiednie napięcia międzyfazowe tworzą trójkąt równoramienny. Wykorzystując funkcje trygonometryczne można wyprowadzić zależność:

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

Moduł napięcia międzyfazowego w układzie trójfazowym gwiazdowym jest  $\sqrt{3}$  razy większy od modułu napięcia fazowego.

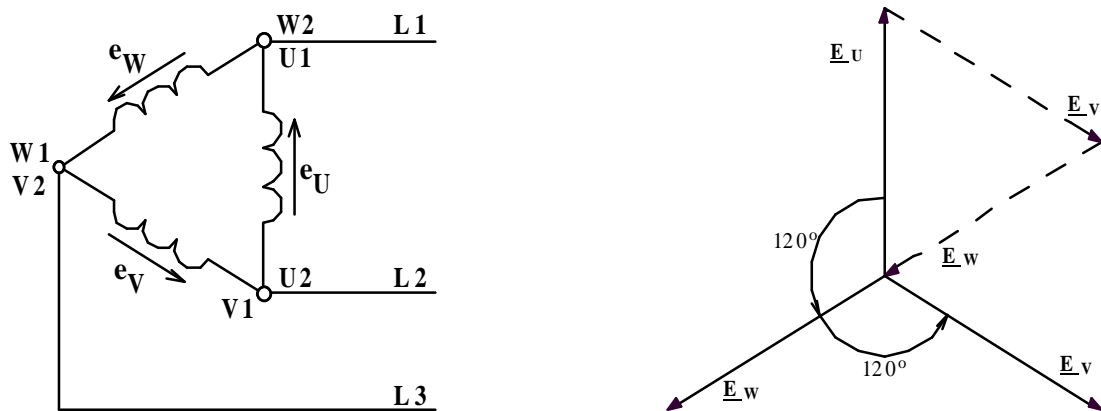
### Układ połączeń uzwojeń prądnicy w trójkąt

Uzwojenia trzech faz prądnicy można połączyć również w taki sposób, że koniec pierwszej fazy będzie połączony z początkiem drugiej, koniec drugiej z początkiem trzeciej, a koniec trzeciej z początkiem pierwszej. Takie połączenie nazywamy połączeniem w trójkąt (rys. 8).

W tak utworzonym oczku działają siły elektromotoryczne fazowe  $e_U, e_V$  i  $e_W$  poszczególnych faz, które są jednocześnie siłami elektromotorycznymi międzyfazowymi. Ich

suma w każdej chwili jest równa zero (porównaj rys. 2.). Wektory  $\underline{E}_U$ ,  $\underline{E}_V$  i  $\underline{E}_W$  tworzą układ symetryczny (rys. 8.b). Dodając te wektory otrzymujemy:

$$\underline{E}_U + \underline{E}_V + \underline{E}_W = 0$$



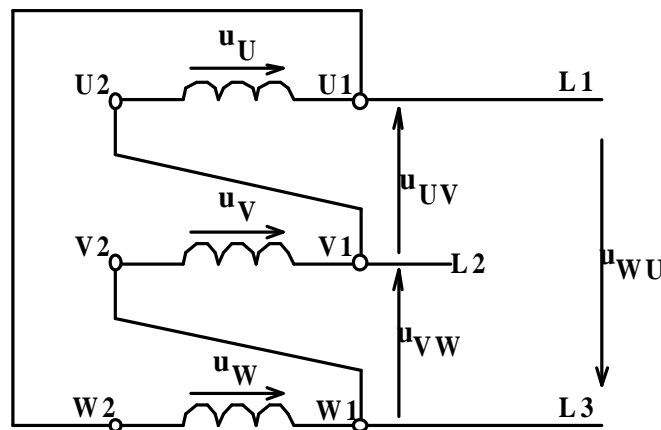
**Rys. 8.** Połączenie uzwojeń prądnicy w trójkąt: a) układ połączeń, b) wykres wektorowy sił elektromotorycznych [2]

Wewnątrz układu trójkątego symetrycznego uzwojeń prądnicy nie obciążonej odbiornikami, prąd nie płynie.

Stosowany w praktyce schemat połączeń w trójkąt przedstawiono na rys. 9.

W układzie trójkątowym moduł napięcia międzyfazowego jest równy modułowi napięcia fazowego, czyli:

$$U = U_f$$



**Rys. 9.** Powszechnie stosowany sposób oznaczania napięć w układzie trójkątowym [2]

Ponieważ układ połączeń w trójkąt jest układem trójprzewodowym, mamy do dyspozycji tylko napięcia międzyfazowe.[1,2]

### 4.1.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jak jest zbudowana prądnica trójfazowa?
2. Jak oznaczamy początki i końce uzwojeń fazowych prądnicy, a jak przewody fazowe?
3. O jaki kąt przesunięte są napięcia w fazach prądnicy trójfazowej symetrycznej?
4. Jakim układem równań opisujemy wartości chwilowe sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach trójfazowej prądnicy symetrycznej?
5. Na czym polega połączenie uzwojeń prądnicy w gwiazdę?
6. Jakie napięcia rozróżniamy w układzie gwiazdowym?
7. Co to jest punkt neutralny układu gwiazdowego, a co przewód neutralny?
8. Jaka jest zależność pomiędzy modulem napięcia fazowego i modulem napięcia międzyfazowego symetrycznej prądnicy połączonej w gwiazdę?
9. Na czym polega połączenie uzwojeń prądnicy w trójkąt?
10. Ile wynosi suma wartości chwilowych (lub suma wektorów) sił elektromotorycznych fazowych w prądnicy prawidłowo połączonej?

### 4.1.3. Ćwiczenia

#### Ćwiczenie 1

Narysuj przebiegi czasowe napięć poszczególnych faz prądnicy trójfazowej, wiedząc, że amplituda napięcia w jednej z faz wynosi 565 V, a jego częstotliwość  $f = 50$  Hz.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) obliczyć okres  $T$  napięcia,
- 2) narysować układ osi współrzędnych,
- 3) nanieść podziałki na osie, przyjmując, że  $100\text{ V} \rightarrow 1\text{ cm}$ ,  $10\text{ ms} \rightarrow 3\text{ cm}$ ,
- 4) narysować przebiegi napięć fazowych,
- 5) oznaczyć napięcia fazowe i międzyfazowe,
- 6) uzasadnić sposób wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- plansze obrazujące wytwarzanie napięcia przemiennego trójfazowego,
- przybory do rysowania,
- kalkulator.

#### Ćwiczenie 2

Określ wykreślnie wartość modułu napięcia międzyfazowego na zaciskach prądnicy trójfazowej symetrycznej skojarzonej w gwiazdę, jeżeli moduł napięcia fazowego wynosi 400 V.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować schemat uzwojeń prądnicy,
- 2) oznaczyć początki i końce uzwojeń fazowych,
- 3) oznaczyć napięcia fazowe i międzyfazowe,

- 4) stosując II prawo Kirchhoffa napisać równania określające wektory napięć międzyfazowych,
- 5) narysować w przyjętej skali wykres napięć fazowych,
- 6) wykreślić napięcia międzyfazowe wykonując działania na wektorach według równań zapisanych w punkcie 4,
- 7) zmierzyć długości wektorów napięć międzyfazowych i podać wartość modułu napięcia międzyfazowego,
- 8) porównać uzyskany wynik z wartością obliczoną na podstawie zależności między napięciem fazowym i międzyfazowym, występującą w symetrycznym układzie gwiazdowym.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- przybory do rysowania,
- kalkulator.

### Ćwiczenie 3

Oblicz wartości napięć między zaciskami prądnicy, której uzwojenia połączono w trójkąt, ale w fazie pierwszej zamieniono początek z końcem uzwojenia. Moduł napięcia jednej fazy wynosi 400 V.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować schemat uzwojeń prądnicy,
- 2) oznaczyć początki i końce uzwojeń fazowych,
- 3) oznaczyć napięcia uwzględniając ich zwroty,
- 4) napisać II prawo Kirchhoffa w postaci wektorowej dla obwodu trójkąta,
- 5) narysować na podstawie równania z punktu 4 (w przyjętej skali) wykres napięć,
- 6) zmierzyć długości wektorów napięć międzyfazowych i podać wartość modułów poszczególnych napięć międzyfazowych,
- 7) ocenić skutek nieprawidłowego połączenia uzwojeń prądnicy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- liniał,
- kątomierz,
- kalkulator.

#### 4.1.4. Sprawdzian postępów

**Czy potrafisz:**

	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
1) wyjaśnić zjawisko powstawania napięć w prądnicy trójfazowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) zapisać równania na wartości chwilowe sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach prądnicy trójfazowej symetrycznej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) scharakteryzować sposoby łączenia uzwojeń fazowych prądnicy trójfazowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) narysować wykresy sił elektromotorycznych dla prądnicy symetrycznej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- |  |                          |                          |
|--|--------------------------|--------------------------|
| 5) narysować i oznaczyć uzwojenia prądnic i zaciski prądnic symetrycznej połączonej w gwiazdę?       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6) nazwać i określić napięcia na zaciskach trójfazowej nieobciążonej prądnic połączonej w gwiazdę?   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7) określić zależność między napięciami fazowymi i międzyfazowymi dla prądnic połączonej w gwiazdę?  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8) narysować i oznaczyć uzwojenia prądnic i zaciski prądnic symetrycznej połączonej w trójkąt?       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9) określić zależność między napięciami fazowymi i międzyfazowymi dla prądnic połączonej w trójkąt?  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10) narysować wykres napięć dla nieobciążonej prądnic trójfazowej symetrycznej połączonej w trójkąt? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

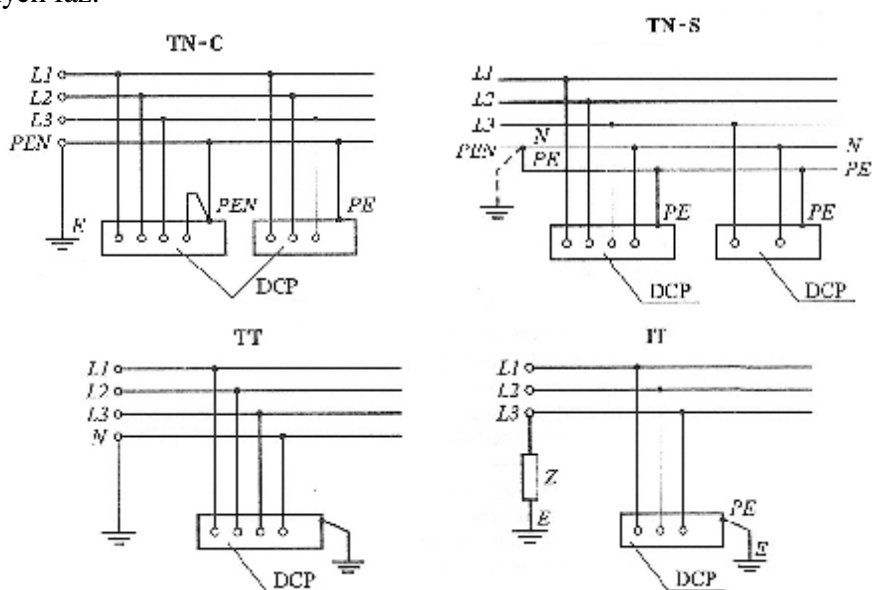


## 4.2. Połączenie odbiorników trójfazowych

### 4.2.1. Materiał nauczania

Z sieci trójfazowych można zasilac zarówno odbiorniki jednofazowe, jak i odbiorniki trójfazowe. Sposób połączenia źródła jest mniej istotny, ponieważ odbiorniki przeważnie są dołączone do sieci trójfazowej systemu elektroenergetycznego, w którym punkt neutralny transformatora trójfazowego może być uziemiony lub izolowany.

W zależności od sposobu połączenia sieci z ziemią oraz od związku pomiędzy częściami przewodzącymi a ziemią, rozróżnia się systemy (układy) sieci przedstawione na rysunku 10 (oznaczenia według PN – IEC 60364–3). Dołączając odbiorniki jednofazowe (między jeden z przewodów fazowych i przewód neutralny) należy pamiętać o równomiernym obciążeniu poszczególnych faz.



**Rys. 10.** Podział układów sieci elektroenergetycznych, gdzie:  $L1, L2, L3$  – przewody fazowe,  $N$  – przewód neutralny,  $PE$  – przewód ochronny,  $PEN$  – przewód ochronno-neutralny,  $DCP$  – dostępne części przewodzące (obudowy),  $E$  – uziemienie robocze,  $Z$  – impedancja [2]

Odbiorniki trójfazowe można łączyć w gwiazdę lub w trójkąt.

### Układy trójfazowe symetryczne

Układ nazywamy symetrycznym, jeżeli symetryczny odbiornik trójfazowy jest zasilany z symetrycznej sieci trójfazowej.

Odbiornik trójfazowy nazywamy symetrycznym, jeżeli impedancje poszczególnych faz są jednakowe. Typowymi odbiornikami trójfazowymi symetrycznymi są transformatory i silniki trójfazowe. Na tabliczce zaciskowej silnika znajdują się oznaczenia literowe (np. U, V, W). Przy ich podłączaniu do sieci trójfazowej należy zwrócić uwagę na kolejność faz napięcia zasilającego i dołączenie przewodów sieci zasilającej L1, L2, L3 odpowiednio do U, V, W (zgodnie z następstwem alfabetycznym liter). Zamiana kolejności faz napięcia zasilającego spowoduje wirowanie silnika w kierunku przeciwnym do założonego konstrukcyjnie. Zjawisko to jest wykorzystywane w układach sterowania, gdzie wymagana jest praca nawrotna silnika.

### Odbiornik trójfazowy symetryczny połączony w gwiazdę

Połączenia odbiornika trójfazowego w gwiazdę i przyłączenie go do zacisków sieci pokazano na rys. 11. Do każdej fazy odbiornika doprowadzone jest napięcie fazowe sieci zasilającej. Dla odbiornika trójfazowego połączonego w gwiazdę zależności między napięciami są analogiczne, jak w przypadku omawianych wcześniej źródeł trójfazowych i można napisać dla wartości chwilowych, że:

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad \text{i} \quad u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0$$

Odpowiednio dla wielkości wektorowych napięć odbiornika występują zależności:

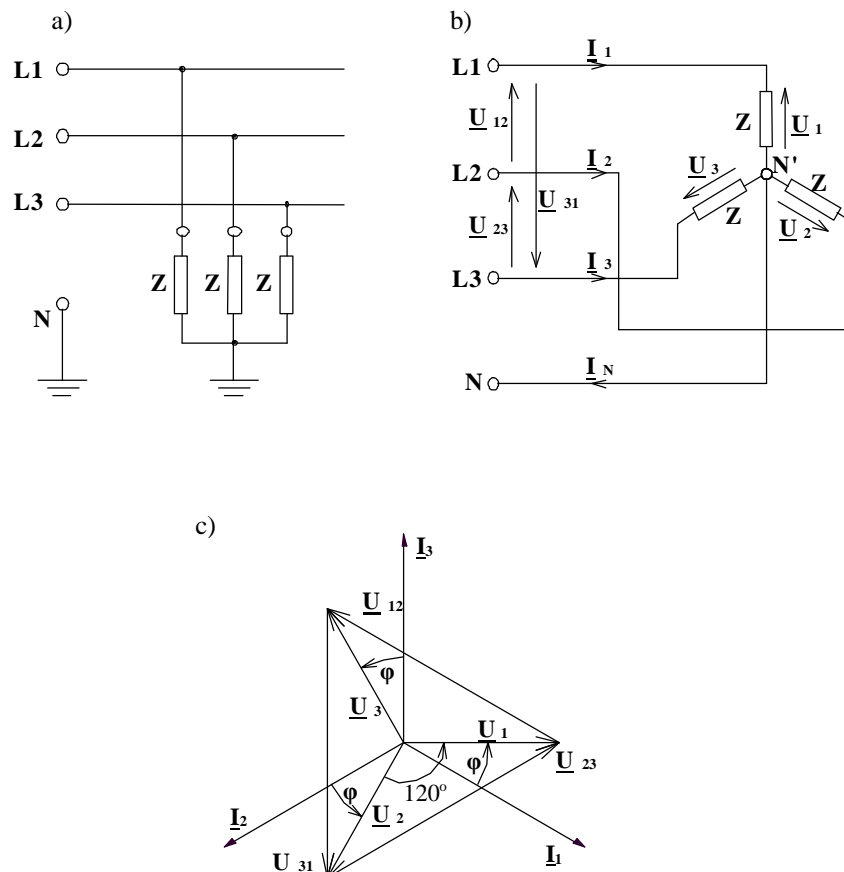
$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0 \quad \text{i} \quad \underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} = 0$$

Prądy płynące przez uzwojenia fazowe źródła oraz poszczególne fazy odbiornika nazywamy prądami fazowymi. Wartości skuteczne tych prądów oznaczamy  $I_f$ .

Prądy płynące w przewodach linii, za pomocą których wyprowadzamy energię ze źródła, nazywamy prądami przewodowymi (albo liniowymi). Wartości skuteczne tych prądów oznaczamy  $I$  (spotyka się także oznaczenie  $I_p$ ).

W układzie połączeń w gwiazdę prądy przewodowe są równe prądom fazowym. W przewodzie neutralnym płynie prąd, którego wartość chwilowa jest równa sumie wartości chwilowych prądów fazowych. Słuszne są zatem zależności:

$$i_N = i_1 + i_2 + i_3, \quad \underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$$



**Rys. 11.** Przyłączenie odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w gwiazdę do sieci trójfazowej: a) sposób przyłączenia do sieci, b) ten sam układ z oznaczeniem prądów i napięć odbiornika, c) wykres wektorowy prądów i napięć dla tego układu [1]

W przypadku układu symetrycznego prądy w poszczególnych fazach odbiornika tworzą układ symetryczny: mają jednakowe moduły i są przesunięte między sobą w fazie co  $120^\circ$ . Suma ich wartości chwilowych wynosi zero. Także suma wektorów tych prądów wynosi zero:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \qquad \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$$

W przypadku obwodu symetrycznego prąd w przewodzie neutralnym nie płynie. Stąd wynika, że odbiorniki trójfazowe symetryczne połączone w gwiazdę należy przyłączać tylko do trzech przewodów fazowych.

Na rysunku 11b przedstawiony jest odbiornik symetryczny połączony w gwiazdę, w sposób ułatwiający zrozumienie zależności w układzie oraz wykres wektorowy napięć i prądów dla tego układu.

Ponieważ odbiornik jest symetryczny, wszystkie prądy są przesunięte względem napięć fazowych o ten sam kąt  $j$ . W przypadku odbiornika rezystancyjnego kąt  $j$  wynosi zero. Wówczas mówimy, że napięcia fazowe i prądy są ze sobą w fazie.

Ponieważ prądy w poszczególnych fazach odbiornika płyną pod wpływem napięć fazowych, których moduły są jednakowe, a obciążenie jest symetryczne, to dla odbiornika trójfazowego symetrycznego słuszne są zależności:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_f; \qquad U_{12} = U_{23} = U_{31} = U$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_f = \frac{U_f}{Z}$$

**Dla układu trójfazowego symetrycznego połączonego w gwiazdę** słuszne są zależności:

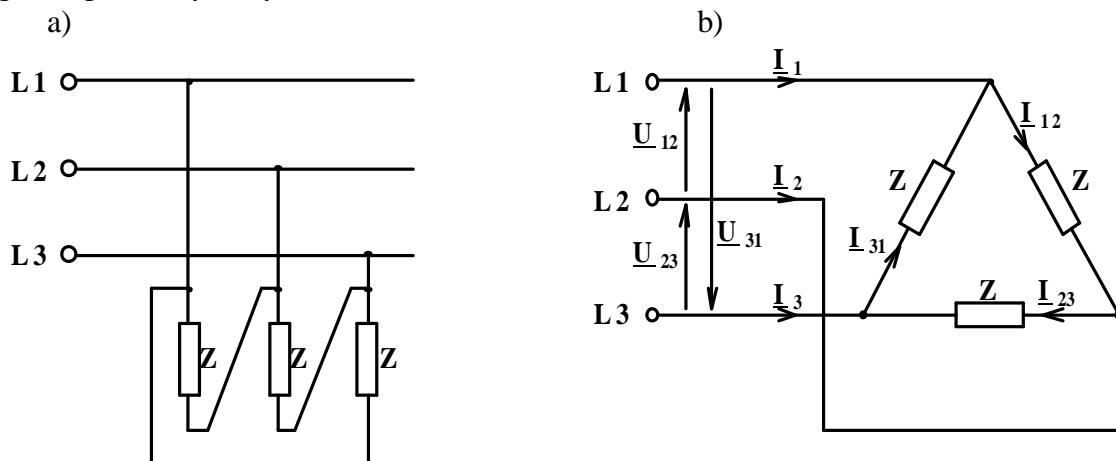
$$U = \sqrt{3}U_f$$

$$I = I_f$$

Napięcia międzyfazowe są  $\sqrt{3}$  razy większe od napięć na fazach odbiornika.  
Prądy przewodowe równe są prądom płynącym w fazach odbiornika

### Odbiornik trójfazowy symetryczny połączony w trójkąt

Odbiornik połączony w trójkąt przyłączamy do trzech przewodów fazowych sieci w sposób pokazany na rys. 12.



**Rys. 12.** Odbiornik trójfazowy symetryczny połączony w trójkąt: a) przyłączony do sieci trójfazowej, b) ten sam układ z zaznaczonymi prądami i napięciami na odbiorniku [1]

Dla rozważań dotyczących napięć i prądów odbiornika połączonego w trójkąt nie ma znaczenia sposób połączenia źródła, bowiem do każdej fazy odbiornika jest doprowadzone napięcie międzyfazowe źródła. Z faktu symetrii źródła i odbiornika wynika, że moduły tych napięć są jednakowe i są one przesunięte względem siebie o  $2\pi/3$  rad, czyli:

$$\underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} = 0$$

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U_f = U$$

We wszystkich fazach odbiornika płyną prądy, które są przesunięte względem siebie o  $2\pi/3$  rad ( $120^\circ$ ), jak napięcia, które je wywołały. Moduły prądów fazowych płynących w gałęziach trójkąta są jednakowe, a ich suma wektorowa wynosi zero:

$$I_{12} = I_{23} = I_{31} = I_f = \frac{U_f}{Z}$$

$$\underline{I}_{12} + \underline{I}_{23} + \underline{I}_{31} = 0$$

Posługując się rachunkiem wektorowym i I prawem Kirchhoffa dla poszczególnych węzłów odbiornika można napisać równania:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}$$

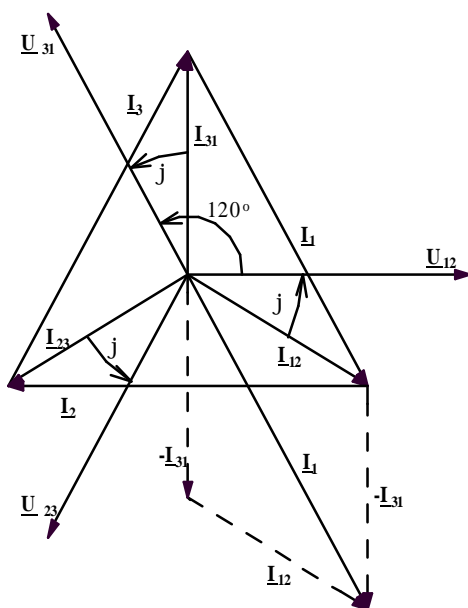
$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}$$

Moduły prądów przewodowych (liniowych) są sobie równe, a suma ich wektorów jest równa zeru (zależności te pokazane są na rys. 13):

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$$



**Rys. 13.** Wykres wektorowy prądów i napięć dla odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w trójkąt [2]

Z zależności dla trójkąta równoramiennego o bokach:  $I_{12}, I_{31}, I_1$  i o kątach:  $2\pi/3, \pi/6, \pi/6$  wynika, że w odbiorniku trójfazowym symetrycznym moduł prądu przewodowego jest  $\sqrt{3}$  razy większy od modułu prądu fazowego, czyli:  $I = \sqrt{3}I_f$

**Dla układu trójfazowego symetrycznego połączonego w trójkąt** słuszne są zależności:

$$U = U_f$$

$$I = \sqrt{3}I_f$$

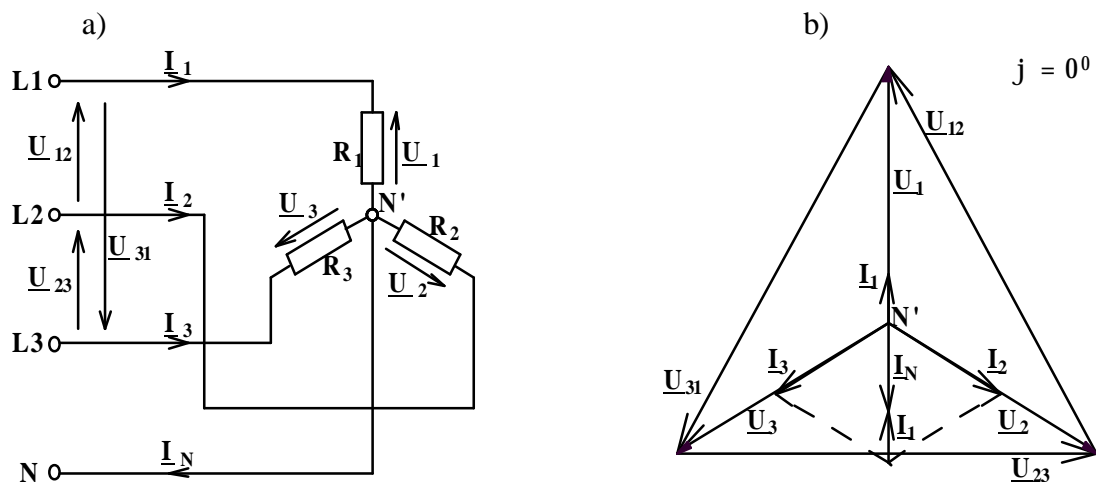
## Układy trójfazowe niesymetryczne

Układ trójfazowy nazywamy niesymetrycznym, jeżeli niesymetryczne jest źródło albo odbiornik bądź oba te obwody. Asymetria źródła polega na tym, że napięcia źródłowe nie tworzą symetrycznej gwiazdy (na skutek nierówności napięć generowanych w poszczególnych uzwojeniach albo różnych przesunięć fazowych poszczególnych faz). Spowodowane to jest uszkodzeniem źródła lub nieprawidłowym połączeniem uzwojeń.

W praktyce najczęściej mamy do czynienia z asymetrią polegającą na: zaniku napięcia jednej fazy, przerwy w jednej fazie odbiornika, obciążeniu poszczególnych faz różnymi impedancjami.

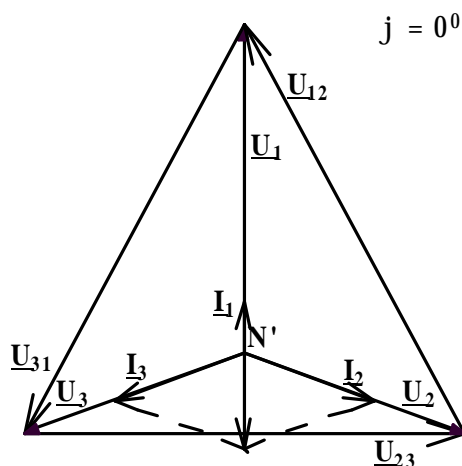
Przypadki asymetrii dla odbiornika połączonego w gwiazdę (rys. 14):

- odbiornik dołączony do symetrycznej sieci czteroprzewodowej, asymetria spowodowana obciążeniem pierwszej fazy mniejszym prądem ( $R_1 > R_2 = R_3$ ). Z wykresu wektorowego (rys. 14b) wynika, że asymetria obciążenia w linii czteroprzewodowej nie wpływa na asymetrię napięć fazowych – przewodem neutralnym popłynie prąd  $I_N$  wyrównujący potencjały punktów neutralnych transformatora i odbiornika.



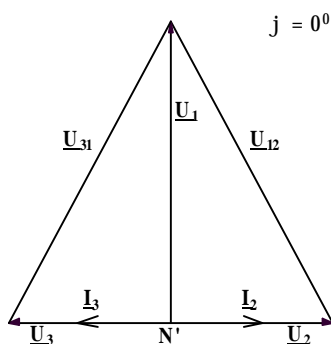
**Rys. 14.** Niesymetryczny odbiornik połączony w gwiazdę: a) układ połączeń, b) wykres wektorowy dla linii czteroprzewodowej [1]

- ten sam odbiornik przyłączony do linii trójprzewodowej (lub przy przzerwaniu przewodu neutralnego). Napięcia fazowe nie są symetryczne (ich moduły mają różną wartość i nie są przesunięte względem siebie o  $120^\circ$ ). Największą wartość ma napięcie w fazie obciążonej największą rezystancją, czyli najmniejszym prądem. Potencjał punktu neutralnego odbiornika różni się od potencjału punktu neutralnego transformatora w linii. Wykres napięć i prądów dla tego przypadku przedstawiono na rys. 15.



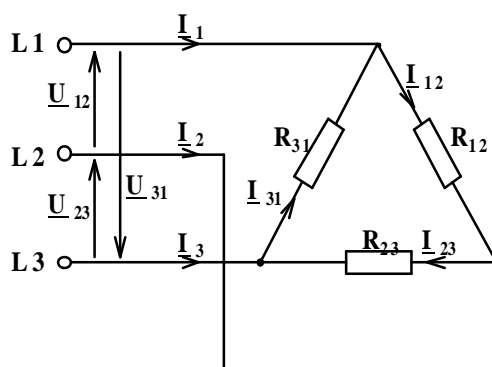
Rys. 15. Wykres dla odbiornika o różnych rezystancjach fazowych przyłączonego do sieci trójprzewodowej

- odbiornik jak na rys.14a w przypadku przerwy w pierwszej fazie ( $R_1 = \infty, R_2 = R_3$ ), linia trójprzewodowa. W fazie pierwszej prąd nie płynie, a  $R_2$  i  $R_3$  są połączone szeregowo i zasilane napięciem międzyfazowym. Rozkład prądów i napięć fazowych jest niesymetryczny – rys. 16.



Rys. 16. Wykres dla przypadku przerwy w jednej fazie odbiornika połączonego w gwiazdę

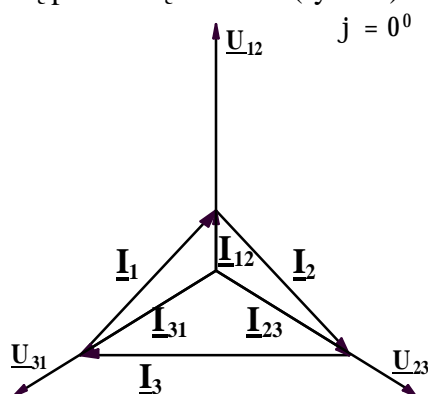
Przypadki asymetrii dla odbiornika połączonego w trójkąt (rys. 17):



Rys. 17. Schemat odbiornika trójfazowego niesymetrycznego połączonego w trójkąt

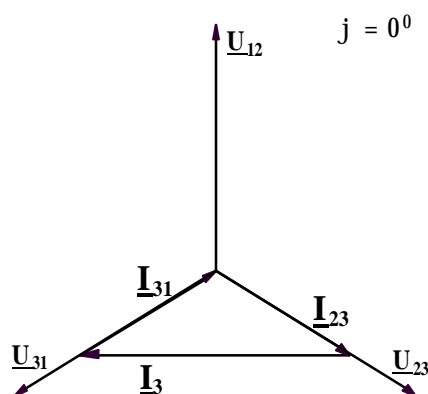
Zakładamy, że:  $R_{12} > R_{23} = R_{31}$ , układ napięć zasilających symetryczny; asymetria obciążenia wpływa na wartość prądów fazowych i przewodowych. Prąd w fazie obciążonej większą rezystancją, a także w przewodach przyłączonych do tej fazy ma mniejszą wartość.

Prądy fazowe i przewodowe są przesunięte o  $120^\circ$ , ponieważ napięcia doprowadzone do poszczególnych faz odbiornika są przesunięte o  $120^\circ$  (rys. 18).



**Rys. 18.** Wykres wektorowy dla odbiornika niesymetrycznego (różne rezystancje fazowe) połączonego w trójkąt

Zakładamy, że:  $R_{12} = \infty, R_{23} = R_{31}$ . Wystąpił brak symetrii prądów. Prąd  $I_3$  nie zmienia swojej wartości, prądy  $I_1$  i  $I_2$  zmalały i są równe prądom fazowym (rys. 19)



**Rys. 19.** Wykres wektorowy dla odbiornika rezystancyjnego połączonego w trójkąt w przypadku przerwy w jednej gałęzi odbiornika

Przed przyłączeniem odbiornika trójfazowego do sieci należy zapoznać się z danymi znamionowymi tego miernika i parametrami sieci. W sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia stosowany jest zwykle układ czteroprzewodowy o napięciu 400/230 V.

W obwodach trójfazowych prądy i napięcia mierzymy miernikami o ustroju elektromagnetycznym lub elektrodynamycznym.

Przy pomiarze napięć i prądów w odbiornikach trójfazowych symetrycznych wystarczy zmierzyć jeden z prądów i jedno z napięć. W przypadku odbiornika niesymetrycznego lub nieprawidłowej pracy odbiornika symetrycznego należy zmierzyć wszystkie prądy i napięcia. Analiza wyników pomiarów może być wskazówką do ustalenia rodzaju uszkodzenia układu.

Przy pomiarze prądów i napięć o znacznej wartości mierniki załączamy do układu poprzez przekładniki. [1, 2].

## 4.2.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jaka jest zależność między napięciem fazowym i międzyfazowym dla symetrycznego odbiornika połączonego w gwiazdę?
2. Jaka jest zależność między prądem fazowym i przewodowym dla symetrycznego odbiornika połączonego w gwiazdę?
3. Jaka jest zależność między napięciem fazowym i międzyfazowym dla odbiornika połączonego w trójkąt?
4. Jaka jest zależność między prądem fazowym i przewodowym dla odbiornika połączonego w trójkąt?
5. Czy odbiornik trójfazowy może być kojarzony dowolnie: w trójkąt lub w gwiazdę przy podłączaniu do sieci o określonym napięciu?
6. Jaki prąd płynie w przewodzie neutralnym w układzie symetrycznym?
7. Jaką rolę pełni przewód neutralny?
8. Czy w przewodzie neutralnym wolno instalować bezpieczniki?
9. W jaki sposób mierzymy prądy w odbiornikach trójfazowych symetrycznych i niesymetrycznych?
10. W jaki sposób dokonujemy pomiaru napięć odbiorników trójfazowych?
11. Dla jakich odbiorników trójfazowych istotna jest kolejność faz przy podłączaniu ich do sieci?

## 4.2.3. Ćwiczenia

### Ćwiczenie 1

Określ zależności między napięciami fazowymi i międzyfazowymi oraz prądami fazowymi i przewodowymi dla odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w gwiazdę przyłączonego do trójfazowej czteroprzewodowej sieci zasilającej.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować odbiornik połączony w gwiazdę, przyłączony do zacisków sieci,
- 2) oznaczyć napięcia fazowe i międzyfazowe oraz prądy fazowe odbiornika,
- 3) podać zależności między napięciami fazowymi i międzyfazowymi oraz prądami fazowymi i przewodowymi odbiornika, stosując oznaczenia przyjęte w narysowanym schemacie,
- 4) narysować wykres wektorowy dla tego układu, przy założeniu, że odbiornik ma charakter pojemnościowy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- liniał,
- kątomierz (lub cyrkiel).

### Ćwiczenie 2

Określ zależności między napięciami fazowymi i międzyfazowymi oraz prądami fazowymi i przewodowymi dla odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w trójkąt przyłączonego do trójfazowej trójprzewodowej sieci zasilającej.

Sposób wykonania ćwiczenia



Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować odbiornik połączony w trójkąt przyłączony do zacisków sieci,
- 2) oznaczyć napięcia oraz prądy fazowe i przewodowe odbiornika,
- 3) podać zależności między napięciami fazowymi i międzyfazowymi oraz prądami fazowymi i przewodowymi odbiornika, stosując oznaczenia przyjęte w narysowanym schemacie,
- 4) narysować wykres wektorowy dla tego układu, przy założeniu, że odbiornik ma charakter indukcyjny.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- liniał,
- kątomierz (lub cyrkiel).

### Ćwiczenie 3

Oblicz wartość prądów płynących w linii czteroprzewodowej (z dostępnym punktem neutralnym transformatora) zasilającej odbiornik połączony w gwiazdę. Napięcie międzyfazowe układu zasilającego wynosi 400 V. Każda faza odbiornika ma rezystancję  $R = 46 \Omega$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować odbiornik przyłączony do zacisków sieci,
- 2) obliczyć napięcie fazowe,
- 3) obliczyć prąd,
- 4) podać wartość prądu w przewodzie neutralnym i uzasadnić odpowiedź,
- 5) narysować wykres wektorowy, przyjmując skalę: 1 cm  $\rightarrow$  50 V, 1 cm  $\rightarrow$  0,5 A.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- liniał,
- kątomierz (lub cyrkiel),
- kalkulator.

### Ćwiczenie 4

Oblicz wartość prądów przewodowych płynących w linii sieci trójfazowej trójprzewodowej doprowadzonej do odbiornika połączonego w trójkąt. Napięcie międzyfazowe wynosi 400 V. Każda faza odbiornika ma rezystancję  $R = 46 \Omega$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować odbiornik przyłączony do zacisków sieci,
- 2) obliczyć prądy fazowe,
- 3) obliczyć prądy przewodowe,
- 4) narysować wykres wektorowy, przyjmując skalę: 1 cm  $\rightarrow$  50 V, 1 cm  $\rightarrow$  0,5 A,
- 5) porównać prąd przewodowy tego odbiornika i odbiornika z ćwiczenia poprzedniego (parametry odbiornika i sieci zasilającej te same, inny sposób połączenia odbiornika); porównania dokonać na podstawie obliczeń i wykresów,
- 6) sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- liniał,
- kątomierz (lub cyrkiel),
- kalkulator.

### Ćwiczenie 5

Oblicz wartość prądów fazowych i prąd płynący w przewodzie neutralnym odbiornika połączonego w gwiazdę, który jest przyłączony do sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym 400 V, jeżeli został przerwany jeden przewód fazowy. Każda faza odbiornika ma rezystancję  $R = 46 \Omega$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować odbiornik przyłączony do zacisków sieci,
- 2) oznaczyć na schemacie i obliczyć napięcie fazowe,
- 3) oznaczyć na schemacie i obliczyć prądy przewodowe,
- 4) narysować wykres wektorowy, przyjmując skalę: 1 cm  $\rightarrow$  50 V, 1 cm  $\rightarrow$  0,5 A,
- 5) podać wartość prądu w przewodzie neutralnym.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- liniał,
- kątomierz (lub cyrkiel),
- kalkulator.

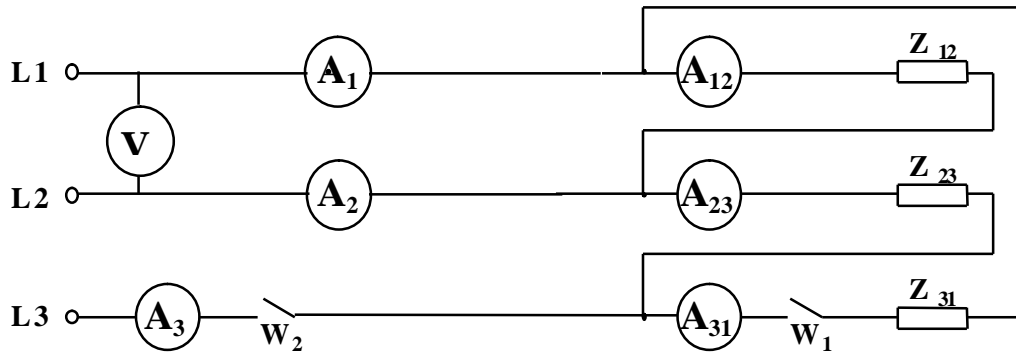
### Ćwiczenie 6

Odbiornik trójfazowy symetryczny połączony w trójkąt jest przyłączony do sieci trójfazowej trójprzewodowej. Sprawdź za pomocą pomiarów, jaki wpływ na wartość napięć i prądów fazowych oraz przewodowych spowoduje brak symetrii układu wywołany przerwą w jednej fazie odbiornika oraz brak symetrii zasilania (przerwa w jednej fazie linii zasilającej).

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) połączyć układ jak na rysunku,
- 2) oszacować wartości prądów i napięć,
- 3) dobrać mierniki odpowiedniego rodzaju i o właściwych zakresach,
- 4) przed przyłączeniem układu do sieci zasilającej sprawdzić w bezpieczny sposób brak napięcia na zaciskach fazowych,
- 5) przygotować tabelę do zapisania wyników pomiarów,
- 6) zgłosić nauczycielowi gotowość wykonywania pomiarów,
- 7) zmierzyć napięcia i prądy i zapisać wyniki dla odbiornika przy:
  - układzie symetrycznym,
  - układzie niesymetrycznym – przerwa w jednej fazie odbiornika,
  - układzie niesymetrycznym – przerwa w przewodzie fazowym linii zasilającej,
- 8) powtórzyć pomiary dla tych przypadków przy asymetrii zasilania (przerwa w przewodzie zasilającym – symulacja wyłącznikiem),
- 9) zanalizować wyniki pomiarów,
- 10) sformułować i zapisać wnioski dotyczące wpływu asymetrii na wartości prądów i napięć.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat połączeń,
- odbiornik trójfazowy symetryczny z możliwością połączenia w trójkąt,
- amperomierze,
- woltomierze (woltomierz i przełącznik woltomierzowy),
- wyłączniki jednofazowe, wyłącznik trójfazowy.

### Ćwiczenie 7

Odbiornik trójfazowy połączony w gwiazdę jest przyłączony do sieci trójfazowej czteroprzewodowej. Sprawdź za pomocą pomiarów, jaki wpływ na wartość prądów i napięć fazowych i międzyfazowych spowoduje brak symetrii odbiornika wywołany dodatkową rezystancją  $R_d$  w jednej fazie oraz brak symetrii zasilania (przerwa w jednej fazie).

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) połączyć układ jak na rysunku (opracowanym w ramach pracy domowej i zatwierdzonym przez nauczyciela),
- 2) oszacować wartości prądów i napięć,
- 3) dobrać mierniki odpowiedniego rodzaju i o właściwych zakresach,
- 4) przed przyłączeniem układu do sieci zasilającej sprawdzić w bezpieczny sposób brak napięcia na zaciskach fazowych,
- 5) przygotować tabelę do zapisania wyników pomiarów,
- 6) zgłosić nauczycielowi gotowość wykonywania pomiarów,
- 7) wykonać pomiary i zapisać wyniki dla odbiornika przyłączonego do linii czteroprzewodowej dla przypadków:
  - odbiornik symetryczny ( $R_d = 0$ ),
  - odbiornik niesymetryczny ( $R_d > 0$ ),
  - odbiornik niesymetryczny – przerwa w przewodzie fazowym ( $R_d = \infty$ ).
- 8) powtórzyć pomiary dla tych przypadków, gdy odbiornik jest przyłączony do linii trójprzewodowej (przerwa w przewodzie neutralnym),
- 9) zanalizować wyniki pomiarów,
- 10) sformułować i zapisać wnioski dotyczące wpływu asymetrii na wartości prądów i napięć.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat połączeń opracowany w ramach pracy domowej,
- odbiornik trójfazowy symetryczny z możliwością połączenia w gwiazdę,
- amperomierze,
- woltomierze (woltomierz i przełącznik woltomierzowy),
- rezystor laboratoryjny,
- wyłączniki jednofazowe, wyłącznik trójfazowy,
- literatura [6].

#### 4.2.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) połączyć odbiornik w gwiazdę i przyłączyć go do sieci trójfazowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) połączyć odbiornik w trójkąt i przyłączyć go do sieci trójfazowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) określić zależności między napięciami fazowymi i międzyfazowymi dla odbiornika połączonego w gwiazdę?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) określić zależności między prądami fazowymi i przewodowymi dla odbiornika połączonego w trójkąt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) obliczyć prądy przewodowe dla dowolnie połączonego odbiornika trójfazowego symetrycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) narysować wykresy wektorowe dla odbiornika trójfazowego symetrycznego o określonej impedancji?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) określić rodzaje i przyczyny asymetrii odbiorników trójfazowych?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) narysować wykres wektorowy dla odbiornika symetrycznego w przypadku przerwy w jednym przewodzie doprowadzającym energię?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) zmierzyć prądy i napięcia w układzie trójfazowym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) dobrać mierniki właściwego rodzaju i o odpowiednich zakresach do pomiarów prądów i napięć?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) określić przyczynę nieprawidłowego działania układu trójfazowego na podstawie wyników pomiarów?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12) przewidzieć niebezpieczeństwa mogące wystąpić przy wykonywaniu pomiarów i zapobiec im?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 4.3. Moc w układach trójfazowych. Poprawa współczynnika mocy

### 4.3.1. Materiał nauczania

W układzie trójfazowym moc chwilowa jest równa sumie mocy chwilowych poszczególnych faz.

#### Moc czynna

Moc czynna (średnia) jest równa sumie mocy czynnych w poszczególnych fazach:

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

gdzie:

$P_1, P_2, P_3$  – moce w poszczególnych fazach,  $P$  – moc odbiornika trójfazowego

czyli:

$$P = U_{1f} I_{1f} \cos j_1 + U_{2f} I_{2f} \cos j_2 + U_{3f} I_{3f} \cos j_3$$

$U_{1f}, U_{2f}, U_{3f}$  – napięcia fazowe,  $I_{1f}, I_{2f}, I_{3f}$  – prądy fazowe,  $j_1, j_2, j_3$  – przesunięcia fazowe.

Dla układu symetrycznego:

$$P = 3U_f I_f \cos j_f$$

Moc wyrażamy zwykle za pomocą napięć międzyfazowych i prądów przewodowych (nie zawsze prądy fazowe odbiornika są dostępne do pomiaru).

Wykorzystując zależności dla układów:

gwiazdowego:  $U_f = \frac{U}{\sqrt{3}}$ ,  $I = I_f$  i trójkątowego:  $U = U_f$ ,  $I_f = \frac{I}{\sqrt{3}}$

moc czynną odbiornika trójfazowego symetrycznego (bez względu na sposób skojarzenia impedancji fazowych) obliczamy ze wzoru:

$$P = \sqrt{3}UI \cos j$$

#### Moc bierna

Moc bierna w układzie trójfazowym jest sumą mocy biernych w poszczególnych fazach, bez względu na symetrię, czyli:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = U_{1f} I_{1f} \sin j_1 + U_{2f} I_{2f} \sin j_2 + U_{3f} I_{3f} \sin j_3$$

W układzie symetrycznym:

$$Q = \sqrt{3}UI \sin j$$

#### Moc pozorna

– dla układu symetrycznego:  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}UI$ ,

– dla układu niesymetrycznego:  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ .

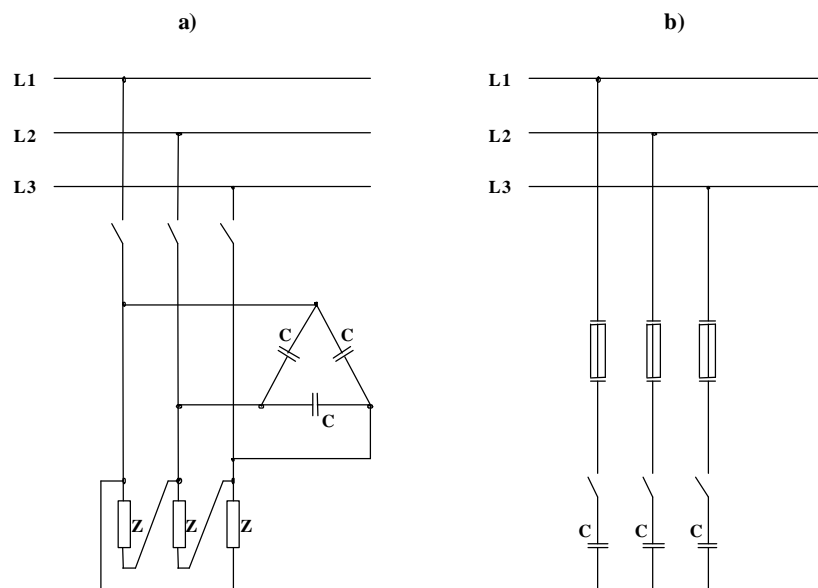
#### Poprawa współczynnika mocy w układach trójfazowych

Znaczenie współczynnika mocy ( $\cos j$ ) i cel jego poprawy z punktu widzenia wykorzystania efektywności urządzeń elektrycznych zostały omówione w jednostce

modułowej 311[08].O1.04. Zagadnienie poprawy współczynnika mocy ma szczególne znaczenie u odbiorców przemysłowych, pobierających znaczną ilość energii czynnej, a tym samym i biernej z sieci energetycznej trójfazowej. Odbiorniki trójfazowe przyłączane do sieci energetycznej często są odbiornikami indukcyjnymi o dużej mocy i przy ich eksploatacji wartość współczynnika mocy nabiera szczególnego znaczenia.

Dla poprawy współczynnika mocy stosuje się kompensację mocy biernej. Może ona być zrealizowana:

- indywidualnie (dla większych jednostek – silników indukcyjnych o mocy  $P > 100$  kW) poprzez dołączenie kondensatorów energetycznych równolegle przy poszczególnych odbiornikach (rys. 20a); gdy odbiornik nie pracuje kondensator wraz z nim jest odłączany od sieci, mimo że inne odbiorniki małej mocy u tego samego odbiorcy też pobierają moc bierną,
- centralnie dla grupy odbiorników lub całej instalacji zasilającej danego odbiorcę (rys. 20b).



**Rys. 20.** Poprawa współczynnika mocy w układzie trójfazowym: a) indywidualna, b) grupowa. [2]

Na tabliczkach znamionowych kondensatorów energetycznych podawane jest zwykle napięcie znamionowe międzyfazowe i moc bierna kondensatora. Pojemność kondensatora, który należy dołączyć do poszczególnych faz odbiornika w celu uzyskaniażądanego współczynnika mocy oblicza się identycznie jak dla obwodów jednofazowych.

Tok obliczeń jest następujący:

- mając dane wielkości odbiornika  $U, P, I$  (bądź grupy odbiorników) obliczamy moc pozorną  $S_1$  i współczynnik mocy ( $\cos j_1$ ) przed kompensacją, (jeżeli nie są znane):

$$S_1 = \sqrt{3}UI,$$

$$\cos j_1 = \frac{P}{S_1}.$$

- obliczamy moc bierną odbiornika przed kompensacją:

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2}.$$

- obliczamy moc pozorną po kompensacji (moc czynna nie ulega zmianie po dołączeniu kondensatora):

$$S_2 = \frac{P}{\cos j_2}.$$

- moc bierna odbiornika trójfazowego po kompensacji:

$$Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P^2}.$$

- moc bierna kondensatora trójfazowego potrzebna do kompensacji (uzyskania pożądanego współczynnika mocy):

$$Q_k = Q_1 - Q_2.$$

- z katalogu kondensatorów dobieramy kondensator trójfazowy o najbliższej mocy w stosunku do wyliczonej  $Q_k$ .

Jeżeli chcemy obliczyć pojemność kondensatora jednej fazy należy:

- obliczyć moc bierną jednej fazy kondensatora  $Q_{kf}$ :

$$Q_{kf} = \frac{Q_k}{3}.$$

- obliczyć pojemność kondensatora (jak w obwodzie jednofazowym):

$$C = \frac{Q_{kf}}{\omega U_f^2}.$$

Przy eksploatacji kondensatorów należy pamiętać o tym, że tracą one powoli swój ładunek i dotknięcie ich ręką nawet po długim czasie od chwili odłączenia może spowodować porażenie. Dotyczy to kondensatorów przy grupowej kompensacji mocy biernej. Dlatego równolegle do tych kondensatorów dołączane są rezystory rozładowujące tak dobrane, aby po czasie około jednej minuty napięcie na zaciskach nie przekraczało dopuszczalnej wartości, nie stanowiącej niebezpieczeństwa dla obsługi. Kondensatory połączone na stałe z odbiornikiem rozładowują się przez ten odbiornik [1, 2, 3].

### 4.3.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jak oblicza się moc czynną odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w gwiazdę lub w trójkąt?
2. Jak zmieni się moc czynna pobierana przez odbiornik utworzony z tych samych elementów po przełączeniu go z gwiazdy w trójkąt, bez zmiany napięcia zasilania?
3. Jak oblicza się moc czynną odbiornika trójfazowego niesymetrycznego połączonego w gwiazdę lub w trójkąt?
4. Jak oblicza się moc bierną odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w gwiazdę lub w trójkąt?
5. Jak oblicza się moc bierną odbiornika trójfazowego niesymetrycznego połączonego w gwiazdę lub w trójkąt?
6. Jak oblicza się moc pozorną odbiornika trójfazowego połączonego w gwiazdę lub w trójkąt?
7. Jaki jest cel poprawy współczynnika mocy ( $\cos j$ )?
8. W jaki sposób można zwiększyć współczynnik mocy układu trójfazowego?
9. Jaki jest sens fizyczny poprawy współczynnika mocy?
10. Jak obliczamy pojemność kondensatorów, aby uzyskać współczynnik mocy o określonej wartości?

### 4.3.3. Ćwiczenia

#### Ćwiczenie 1

Oblicz moc czynną, bierną i pozorną odbiornika trójfazowego symetrycznego indukcyjnego połączonego w gwiazdę, zasilanego z sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym  $U = 400 \text{ V}$ . Moduł impedancji fazowej wynosi  $Z_f = 100 \Omega$ , a rezystancja fazowa  $R_f = 50 \Omega$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) obliczyć współczynnik mocy,
- 2) obliczyć napięcie fazowe,
- 3) obliczyć prąd fazowy i przewodowy,
- 4) napisać zależność na moc pozorną i obliczyć tę moc,
- 5) napisać zależność na moc czynną i obliczyć tę moc,
- 6) napisać zależność na moc bierną odbiornika i obliczyć tę moc,
- 7) ocenić jakość wykonania ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- długopis,
- kalkulator.

#### Ćwiczenie 2

Oblicz moc czynną, bierną i pozorną odbiornika trójfazowego symetrycznego indukcyjnego połączonego w trójkąt, zasilanego z sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym  $U = 400 \text{ V}$ . Moduł impedancji fazowej wynosi  $Z_f = 100 \Omega$ , a rezystancja fazowa  $R_f = 50 \Omega$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) obliczyć prąd każdej fazy odbiornika,
- 2) obliczyć prąd przewodowy,
- 3) obliczyć współczynnik mocy,
- 4) napisać zależność na moc czynną i obliczyć tę moc,
- 5) obliczyć reaktancję fazową oraz  $\sin j$ ,
- 6) napisać zależność na moc bierną odbiornika i obliczyć tę moc,
- 7) napisać zależność na moc pozorną i obliczyć tę moc.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- długopis,
- kalkulator, tablice trygonometryczne (w przypadku kalkulatora bez funkcji trygonometrycznych).



### Ćwiczenie 3

Sprawdź poprzez obliczenia jak zmieni się moc czynna pobierana przez odbiornik trójfazowy rezystancyjny symetryczny połączony w trójkąt po przełączeniu go w gwiazdę. W obu przypadkach odbiornik jest zasilany z sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym  $U = 400 \text{ V}$ , a rezystancja fazowa  $R_f = 100 \Omega$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) obliczyć prąd fazowy odbiornika połączony w trójkąt,
- 2) obliczyć prąd przewodowy odbiornika połączony w trójkąt,
- 3) obliczyć moc czynną tego odbiornika połączony w trójkąt,
- 4) obliczyć napięcie fazowe odbiornika połączony w gwiazdę,
- 5) obliczyć prąd przewodowy odbiornika połączony w gwiazdę,
- 6) obliczyć moc czynną odbiornika połączony w gwiazdę,
- 7) porównać moc pobraną przez odbiornik połączony w trójkąt z mocą tego odbiornika połączony w gwiazdę (obliczyć stosunek  $\frac{P_{\Delta}}{P_Y}$ ),
- 8) porównać prąd przewodowy odbiornika połączony w trójkąt z prądem przewodowym tego odbiornika połączony w gwiazdę (obliczyć stosunek  $\frac{I_{\Delta}}{I_Y}$ ),
- 9) sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- długopis,
- kalkulator.

Uwaga do ćwiczenia: obliczenia mocy wykonać z dokładnością do jednego wata, obliczenia prądów z dokładnością do jednej dziesiątej ampera.

### Ćwiczenie 4

Dobierz pojemność jednej fazy kondensatora trójfazowego połączony w gwiazdę, który należy dołączyć do silnika indukcyjnego trójfazowego o mocy 2,6 kW, aby współczynnik mocy układu po dołączeniu kondensatora wynosił 0,9. Silnik zasilany jest z sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym  $U = 400 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$  i przed dołączeniem kondensatora w każdym przewodzie zasilającym płynął prąd  $I = 5 \text{ A}$ .

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) narysować odbiornik trójfazowy indukcyjny (silnik) podłączony do sieci trójfazowej trójprzewodowej z dołączonym trójfazowym kondensatorem,
- 2) obliczyć moc pozorną przed poprawą współczynnika mocy,
- 3) obliczyć współczynnik mocy przed jego poprawą,
- 4) obliczyć moc bierną przed kompensacją,
- 5) obliczyć moc pozorną i bierną po kompensacji,
- 6) obliczyć potrzebną do kompensacji moc bierną kondensatora trójfazowego oraz jednej fazy kondensatora,

- 7) obliczyć pojemność kondensatora,
- 8) określić zmianę prądu w przewodach linii zasilającej,
- 9) sformułować wnioski dotyczące znaczenia współczynnika mocy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- długopis,
- kalkulator.

#### 4.3.4. Sprawdzian postępów

**Czy potrafisz:**

	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
1) obliczyć moc czynną, bierną i pozorną odbiornika trójfazowego symetrycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) obliczyć moc czynną, bierną i pozorną odbiornika trójfazowego niesymetrycznego	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) ocenić wpływ sposobu połączenia odbiornika trójfazowego (gwiazda, trójkąt) na jego moc?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) uzasadnić cel poprawy współczynnika mocy i sens fizyczny kompensacji mocy biernej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) dobrać kondensatory do poprawy współczynnika mocy do założonej wartości i włączyć je właściwie do układu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 4.4. Pomiar mocy w układach trójfazowych

### 4.4.1. Materiał nauczania

#### Pomiar mocy czynnej w układach trójfazowych

Sposób włączania i niezbędna ilość watomierzy do pomiaru mocy odbiornika trójfazowego zależy od rodzaju odbiornika (symetryczny, niesymetryczny) lub rodzaju układu: trójprzewodowy, czteroprzewodowy, a także dostępności punktu neutralnego odbiornika lub źródła.

#### Pomiar mocy czynnej w układzie trójfazowym czteroprzewodowym:

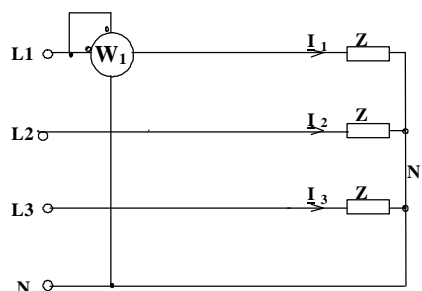
1. Układ symetryczny – odbiornik połączony w gwiazdę – jeden watomierz, którego cewka prądowa jest włączona tak, aby płynął przez nią prąd fazowy, a cewka napięciowa włączona na napięcie fazowe (rys. 21). Watomierz mierzy moc:

$$P_1 = U_f I_f \cos j_f$$

Moc takiego odbiornika:

$$P = 3P_1$$

$P_1$  – wskazanie watomierza

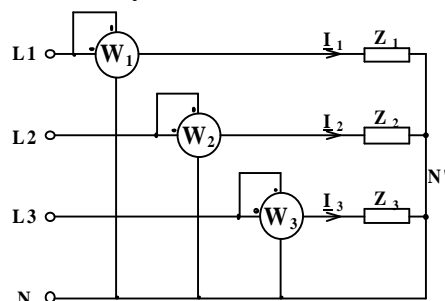


Rys. 21. Pomiar mocy odbiornika trójfazowego symetrycznego w układzie czteroprzewodowym [1]

2. Układ niesymetryczny – stosujemy trzy watomierze włączone jak na rys. 22. Każdy watomierz mierzy moc pobraną przez jedną fazę odbiornika. Moc układu jest równa sumie mocy mierzonych przez poszczególne watomierze:

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

gdzie:  $P_1, P_2, P_3$  – wskazania watomierzy.



Rys. 22. Pomiar mocy odbiornika trójfazowego niesymetrycznego [1]

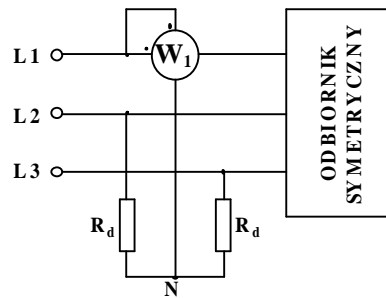
#### Pomiar mocy czynnej w układzie trójfazowym trójprzewodowym:

1. Układ symetryczny: bez względu na sposób połączenia odbiornika (w gwiazdę lub w trójkąt) – jeden watomierz z dodatkowym układem rezystorów do utworzenia sztucznego punktu neutralnego (rys. 23). Rezystancje dodatkowe  $R_d$  są tak dobrane, aby

w fazie, w której jest włączona cewka napięciowa watomierza, rezystancja wypadkowa była równa rezystancji włączonej do każdej z faz pozostałych. Wtedy potencjał punktu neutralnego utworzonej gwiazdy jest równy zero i cewka napięciowa watomierza jest włączona na napięcie fazowe. Jako  $R_d$  można wykorzystać cewki napięciowe dwóch watomierzy identycznych jak włączony w jedną z faz.

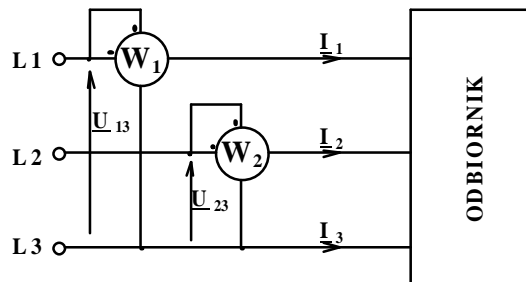
Moc układu:

$$P = 3P_1$$



**Rys. 23.** Pomiar mocy czynnej odbiornika trójfazowego symetrycznego w układzie trójprzewodowym. [1]

- W linii trójprzewodowej można stosować pomiar mocy dwoma amperomierzami. Metoda ta jest słuszna zarówno dla układów symetrycznych jak i niesymetrycznych. Układ taki nazywa się układem Arona (rys. 24). Cewki prądowe amperomierzy włączone są szeregowo w dwie dowolne fazy, początki cewek napięciowych włączone są między te fazy i fazę wolną.



**Rys. 24.** Pomiar mocy czynnej odbiornika trójfazowego dwoma watomierzami (układ Arona) [1]

Moc układu obliczamy sumując wskazania obu watomierzy

$$P = P_1 + P_2,$$

gdzie:  $P_1, P_2$ , – wskazania watomierzy

Uzasadnienie słuszności tej metody można przeprowadzić dla obwodu z rys. 24.

Moc chwilowa układu trójfazowego w każdej chwili jest sumą mocy w poszczególnych fazach:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3$$

ponieważ :  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ , stąd:  $i_3 = -i_1 - i_2$

po wstawieniu  $i_3$  do równania na moc chwilową układu otrzymujemy:

$$p = (u_1 - u_3) i_1 + (u_2 - u_3) i_2$$

Różnica napięć chwilowych dwóch faz jest równa napięciu międzyfazowemu:

$$u_1 - u_3 = u_{13}, \quad u_2 - u_3 = u_{23}$$

Po uwzględnieniu tych zależności równanie określające moc chwilową układu trójfazowego otrzymuje postać:

$$P = u_{13}i_1 + u_{23}i_2$$

Przez cewkę prądową watomierza  $W_1$  płynie prąd  $i_1$ , a jego cewka napięciowa jest załączona na napięcie  $u_{13}$ . Watomierz  $W_1$  mierzy wartość średnią  $P_1$  iloczynu  $u_{13}i_1$ . Odpowiednio watomierz  $W_2$  mierzy wartość średnią  $P_2$ . Dwa watomierze mierzą moc w całym układzie:

$$P = P_1 + P_2,$$

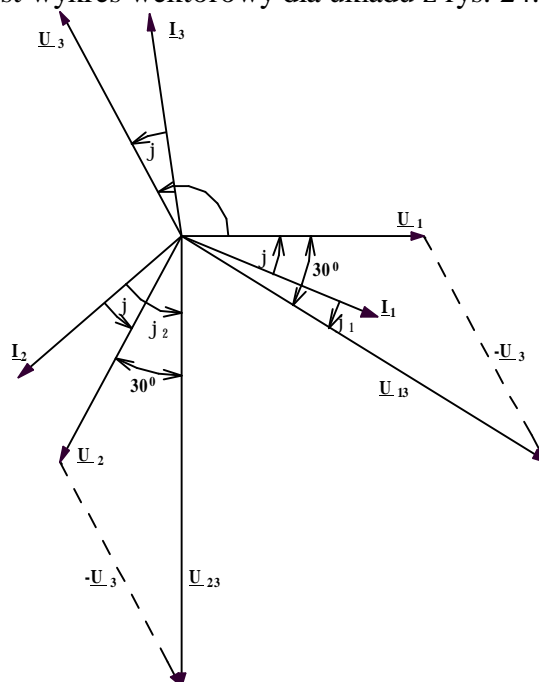
gdzie:  $P_1 = U_{13}I_1 \cos j_1$ ,

$P_2 = U_{23}I_2 \cos j_2$ ,

$j_1$  – kąt pomiędzy napięciem  $U_{13}$ , a prądem  $I_1$ ,

$j_2$  – kąt pomiędzy napięciem  $U_{23}$ , a prądem  $I_2$ .

Na rys. 25 przedstawiony jest wykres wektorowy dla układu z rys. 24.



**Rys. 25.** Wykres wektorowy dla odbiornika symetrycznego do objaśnienia pomiaru mocy dwoma watomierzami. [1]

Z wykresu widać, że:  $j_1 = 30^\circ - j$ ,  $j_2 = 30^\circ + j$

Przy tak włączonych watomierzach jak na rysunku, jeżeli kąt  $j$  będzie mniejszy od  $30^\circ$ , lub ujemny (w przypadku odbiornika o charakterze pojemnościowym), jedno ze wskazań watomierzy może być ujemne (watomierz odchyła się w przeciwną stronę). W takim przypadku należy zamienić początek z końcem cewki napięciowej (lub prądowej) tego watomierza, a jego wskazania do obliczenia mocy układu przyjmować ze znakiem „-”. Jednakowe wskazania watomierzy będą tylko przy  $j = 0$ , czyli dla odbiornika rezystancyjnego.

Przy pomiarach mocy (bez względu na metodę) trzeba zwracać uwagę na dobór właściwych zakresów cewki prądowej i napięciowej watomierza. Należy pamiętać, że watomierz pokazuje iloczyn trzech wielkości: prądu, napięcia i cos kąta pomiędzy nimi zawartego. Wskazanie watomierza mniejsze od maksymalnego dla danego zakresu nie oznacza wcale, że jeden z jego obwodów nie został przeciążony. Dlatego przed włączeniem watomierza należy oszacować wartość prądu i odpowiednio dobrać zakres prądowy

watomierza. Wskazane jest włączenie amperomierza szeregowo z cewką prądową watomierza. Takie działanie jest zasadne, ponieważ dopuszczalne przekroczenia zakresu prądowego watomierza wynoszą zwykle nie więcej niż 20%.

### Pomiar mocy biernej w układach trójfazowych

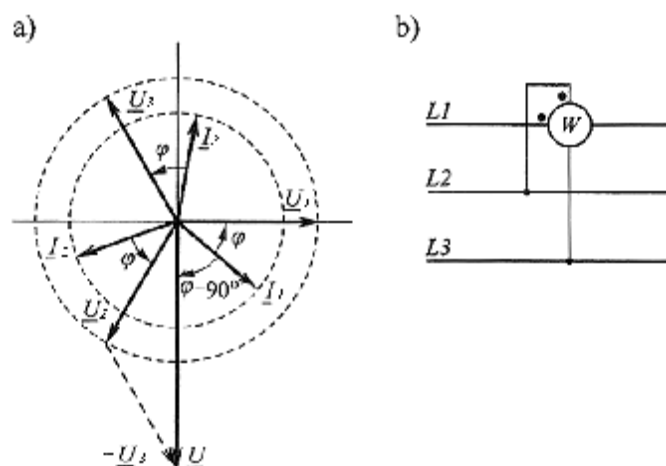
Moc bierną można mierzyć bezpośrednio za pomocą mierników elektrodynamicznych zwanych waromierzami. W waromierzu faza prądu w cewce napięciowej jest przez specjalny układ przesunięta o  $90^\circ$  względem fazy napięcia.

Wykorzystując zależność matematyczną:  $\sin j = \cos(90^\circ - j)$ , oraz fakt, że w linii trójfazowej występuje naturalne przesunięcie między napięciem fazowym i jednym z napięć międzyfazowych o  $90^\circ$  zauważamy, że moc bierną można mierzyć za pomocą odpowiednio włączonych watomierzy.

Ponieważ watomierze są powszechnie stosowanymi przyrządami omówione zostaną zasady zastosowania watomierzy do pomiaru mocy biernej.

### Pomiar mocy biernej odbiornika symetrycznego

1. Jednym watomierzem – na układ pomiarowy i wykres wektorowy dla poparcia słuszności tej metody jest przedstawiony na rys. 26.



Rys. 26. Pomiar mocy biernej odbiornika symetrycznego w linii trójprzewodowej [1]

Moc bierna tego odbiornika wynosi:

$$Q = \sqrt{3}P_w,$$

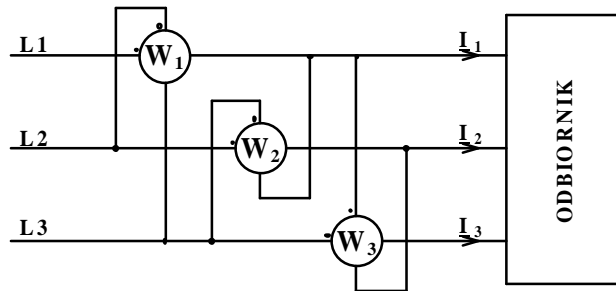
gdzie:  $P_w$  – wskazanie watomierza.

2. Za pomocą dwóch watomierzy włączonych do pomiaru mocy czynnej w układzie Arona (rys. 24) – można wykazać, że moc bierna jest równa różnicy wskazań obu watomierzy pomnożonej przez  $\sqrt{3}$ , czyli:

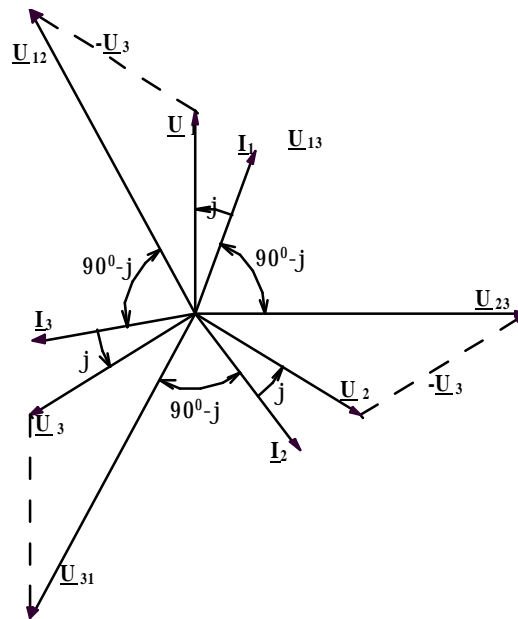
$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$$

### Pomiar mocy biernej odbiornika niesymetrycznego

Pomiar należy przeprowadzić w układzie pokazanym na rys. 27. Wykres dla tego układu przedstawiono na rys. 28.



Rys. 27. Pomiar mocy biernej odbiornika niesymetrycznego trzema watomierzami. [1]



Rys. 28. Wykres ilustrujący sposób włączania watomierzy do pomiaru mocy biernej. [1]

Moc bierna w układzie jak na rys. 27 wynosi:

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\sqrt{3}}$$

gdzie:

$Q_1, Q_2, Q_3$  – wskazania watomierzy.

Należy pamiętać, że omówiony wyżej sposób pomiaru mocy można zastosować dla niesymetrycznego odbiornika, ale przy symetrycznym układzie napięć zasilających.

#### 4.4.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jak można mierzyć moc czynną w układach trójfazowych symetrycznych?
2. Jak można mierzyć moc czynną w układach trójfazowych niesymetrycznych?
3. Jak należy włączyć watomierze przy pomiarze mocy czynnej w układach trójfazowych metodą dwóch watomierzy (metoda Arona)?
4. W jakim przypadku przy stosowaniu do pomiaru mocy dwóch watomierzy ich wskazania będą jednakowe?
5. Co należy zrobić w przypadku, gdy jeden z watomierzy odchyła się w przeciwną stronę?
6. Jak można wyjaśnić przyczynę wychylenia się watomierzy w różnych kierunkach?
7. W jaki sposób mierzymy moc bierną odbiorników trójfazowych symetrycznych?
8. W jaki sposób mierzymy moc bierną odbiorników trójfazowych niesymetrycznych?

### 4.4.3. Ćwiczenia

#### Ćwiczenie 1

Zmierz moc czynną oraz prądy i napięcia konieczne do określenia mocy biernej, pozornej i  $\cos j$  odbiornika trójfazowego połączonego w gwiazdę. Sprawdź za pomocą pomiarów, jaki wpływ na wartość mierzonych i obliczanych wielkości ma brak symetrii odbiornika oraz symetrii zasilania w przypadku linii czteroprzewodowej i trójprzewodowej.

#### Sposób wykonania ćwiczenia

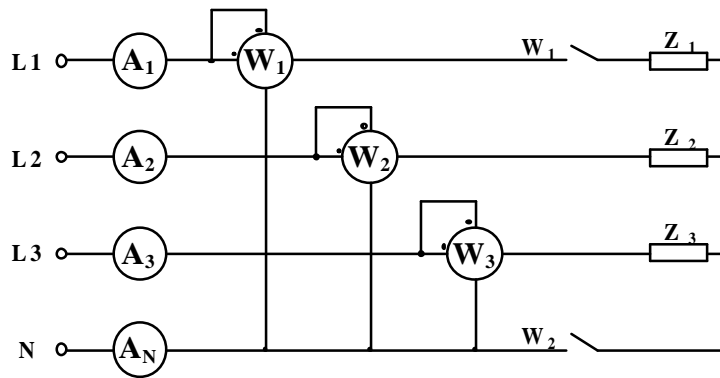
Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z danymi znamionowymi odbiornika i sieci zasilającej oraz schematem połączeń (rysunek do ćwiczenia),
- 2) przerysować schemat do zeszytu,
- 3) połączyć układ jak na rysunku,
- 4) oszacować wartości prądów i napięć,
- 5) dobrać mierniki odpowiedniego rodzaju i o właściwych zakresach,
- 6) przed przyłączeniem układu do sieci zasilającej sprawdzić w bezpieczny sposób brak napięcia na zaciskach fazowych,
- 7) sporządzić wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego z opisem ich danych eksploatacyjnych,
- 8) przygotować tabelę do zapisania wyników pomiarów:  $I_1, I_2, I_3, I_N, U_{12}, U_{23}, U_{31}, U_1, U_2, U_3, P_1, P_2, P_3$  oraz obliczeń:  $\sum P$  (suma wskazań watomierzy),  $S, \cos j, Q$  dla następujących przypadków:
  - odbiornik symetryczny z przewodem neutralnym,
  - odbiornik niesymetryczny z przewodem neutralnym,
  - odbiornik symetryczny z przewodem neutralnym z przerwą jednej fazy,
- 9) zgłosić nauczycielowi gotowość do wykonywania pomiarów,
- 10) wykonać pomiary dla wymienionych przypadków, zapisać wyniki w przygotowanej tabeli,
- 11) wykonać obliczenia,
- 12) zanalizować wyniki pomiarów i obliczeń,
- 13) sformułować i zapisać wnioski dotyczące wpływu asymetrii na wartości mocy i pozostałych wielkości.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat połączeń (rysunek do ćwiczenia),
- odbiornik trójfazowy symetryczny impedancyjny,
- amperomierze,
- watomierze,
- woltomierze (woltomierz i przełącznik woltomierzowy),
- rezystor laboratoryjny,
- wyłączniki jednofazowe, wyłącznik trójfazowy.





Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Uwagi do wykonania ćwiczenia:

- moc pozorną dla układu symetrycznego obliczyć z zależności:  $S = \sqrt{3}UI$ , gdzie  $U, I$  – średnie wartości wskazań woltomierzy i amperomierzy; dla układu niesymetrycznego moc pozorną obliczyć jako sumę iloczynów napięć i prądów w poszczególnych fazach:  $S = U_1I_1 + U_2I_2 + U_3I_3$ ,
- moc bierną dla każdego przypadku obliczyć z zależności:  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ .

## Ćwiczenie 2

Zmierz moc czynną oraz prądy i napięcia konieczne do określenia mocy biernej, pozornej i  $\cos j$  odbiornika trójfazowego impedancyjnego połączonego w trójkąt. Sprawdź za pomocą pomiarów jaki wpływ na wartość mierzonych i obliczanych wielkości ma brak symetrii odbiornika oraz symetrii zasilania.

Sposób wykonania ćwiczenia

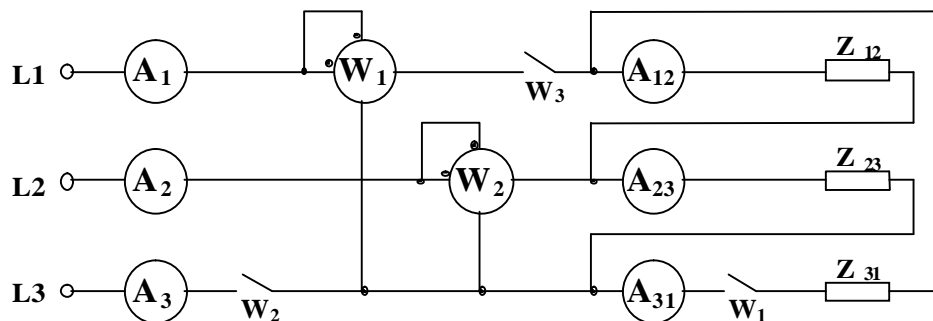
Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z danymi znamionowymi odbiornika i sieci zasilającej oraz schematem połączeń (rysunek do ćwiczenia),
- 2) przerysować schemat do zeszytu,
- 3) połączyć układ jak na rysunku,
- 4) oszacować wartości prądów i napięć,
- 5) dobrać mierniki odpowiedniego rodzaju i o właściwych zakresach,
- 6) przed przyłączeniem układu do sieci zasilającej sprawdzić w bezpieczny sposób brak napięcia na zaciskach fazowych,
- 7) sporządzić wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego z opisem ich danych eksploatacyjnych,
- 8) przygotować tabelę do zapisania wyników pomiarów:  $I_1, I_2, I_3, I_{12}, I_{23}, I_{31}, U_{12}, U_{23}, U_{31}, P_1, P_2$  oraz obliczeń:  $\sum P$  (suma wskazań watomierzy),  $S, \cos j, Q$  dla następujących przypadków:
  - odbiornik symetryczny,
  - odbiornik symetryczny z przerwą w fazie L13,
  - odbiornik symetryczny z przerwą przewodu L3,
  - odbiornik symetryczny z przerwą przewodu L1,
  - odbiornik niesymetryczny (dodatkowa rezystancja w jednej fazie),
- 9) zgłosić nauczycielowi gotowość do wykonywania pomiarów,

- 10) wykonać pomiary dla wymienionych przypadków, zapisać wyniki w przygotowanej tabeli,
- 11) wykonać obliczenia,
- 12) zanalizować wyniki pomiarów i obliczeń,
- 13) sformułować i zapisać wnioski dotyczące wpływu asymetrii na wartości mocy i pozostałych wielkości.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat połączeń (rysunek do ćwiczenia),
- odbiornik trójfazowy symetryczny,
- amperomierze,
- watomierze,
- woltomierze (woltomierz i przełącznik woltomierzowy),
- rezystor laboratoryjny,
- wyłączniki jednofazowe, wyłącznik trójfazowy.



Rysunek do ćwiczenia [źródło własne]

Uwagi do wykonania ćwiczenia:

- moc pozorną dla układu symetrycznego obliczyć z zależności:  $S = \sqrt{3}UI$ , gdzie  $U, I$  – średnie wartości wskazań woltomierzy i amperomierzy; dla układu niesymetrycznego moc pozorną obliczyć jako sumę iloczynów napięć i prądów w poszczególnych fazach:  $S = U_1I_1 + U_2I_2 + U_3I_3$ ,
- moc bierną dla każdego przypadku obliczyć z zależności:  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ .

### Ćwiczenie 3

Zmierz moc bierną odbiornika trójfazowego symetrycznego dwoma i trzema watomierzami. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oblicz współczynnik mocy.

Sposób wykonania ćwiczenia

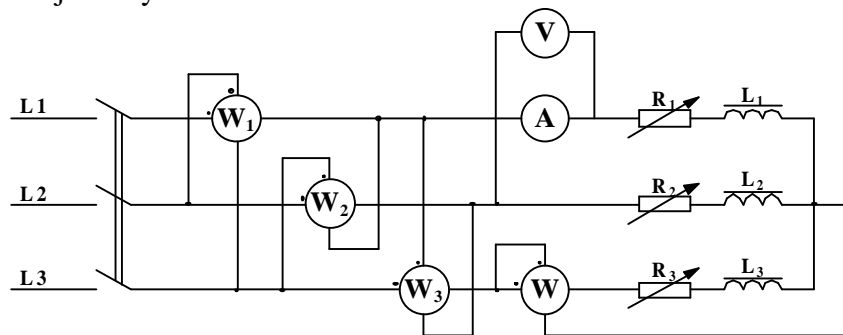
Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z danymi znamionowymi odbiornika i sieci zasilającej oraz schematami połączeń (rysunki 1 i 2 do ćwiczenia),
- 2) przerysować schemat 1 do zeszytu,
- 3) połączyć układ jak na rysunku,
- 4) oszacować wartości prądów i napięć,
- 5) dobrać mierniki odpowiedniego rodzaju i o właściwych zakresach,

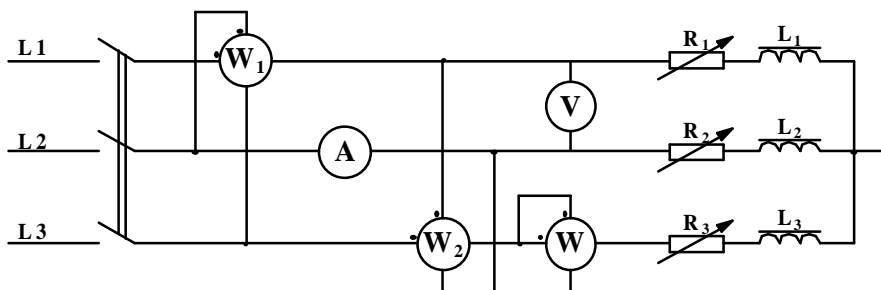
- 6) przed przyłączeniem układu do sieci zasilającej sprawdzić w bezpieczny sposób brak napięcia na zaciskach fazowych,
- 7) sporządzić wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego z opisem ich danych eksploatacyjnych,
- 8) przygotować tabelę do zapisania wyników pomiarów:  $Q_1, Q_2, Q_3, P_f, I, U$  oraz obliczeń:  $Q, P, S, \cos j$ ,
- 9) zgłosić nauczycielowi gotowość do wykonywania pomiarów,
- 10) wykonać pomiary i zapisać wyniki w przygotowanej tabeli,
- 11) powtórzyć czynności 2–7 dla układu według rysunku 2,
- 12) wykonać obliczenia,
- 13) porównać wyniki pomiarów i obliczeń uzyskane dwiema metodami.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schematy połączeń (rys. 1 i 2 do ćwiczenia),
- odbiornik trójfazowy symetryczny (jako odbiornik trójfazowy można wykorzystać uzwojenie pierwotne transformatora trójfazowego połączone z rezystorami suwakowymi),
- amperomierz,
- watomierze elektrodynamiczne,
- woltomierz,
- wyłącznik trójfazowy.



Rysunek 1 do ćwiczenia – pomiar mocy biernej trzema watomierzami [6]



Rysunek 2 do ćwiczenia – pomiar mocy biernej dwoma watomierzami [6]

Uwaga do wykonania ćwiczenia:

Dla obu metod przygotować wspólną tabelę – w metodzie dwóch watomierzy do pomiaru mocy biernej jedna rubryka pozostanie pusta.

#### 4.4.4. Sprawdzenie postępów

Czy potrafisz:

	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
1) dobrać watomierze do pomiaru mocy czynnej i biernej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) zmierzyć moc czynną odbiornika trójfazowego symetrycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) zmierzyć moc czynną odbiornika trójfazowego niesymetrycznego	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) zmierzyć moc bierną odbiornika symetrycznego	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) zmierzyć moc bierną odbiornika niesymetrycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) wyjaśnić zasadę pomiaru mocy czynnej odbiornika trójfazowego dwoma watomierzami (układ Arona)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) uzasadnić możliwość pomiaru mocy biernej watomierzami i sposób ich włączenia?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) na podstawie pomiarów wyznaczyć współczynnik mocy odbiornika?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) zanalizować pracę układu trójfazowego na podstawie pomiarów mocy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 4.5. Pomiar energii elektrycznej w układach trójfazowych

### 4.5.1. Materiał nauczania

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

$$W = Pt$$

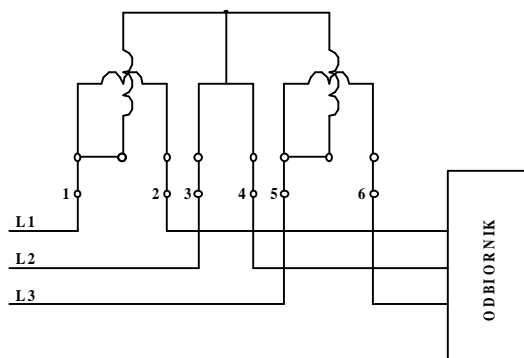
Zwyczajowo przyjęte jest określanie energii elektrycznej czynnej po prostu energią elektryczną.

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

Energię można zmierzyć pośrednio mierząc moc (właściwą metodą) i czas. Do bezpośredniego pomiaru energii w układach trójfazowych najczęściej stosuje się liczniki indukcyjne trójfazowe. Zasada działania licznika mierzącego moc w układzie trójfazowym jest taka sama jak licznika jednofazowego, natomiast liczniki te różnią się budową.

Cewki licznika trójfazowego są połączone tak jak cewki watomierzy do pomiaru mocy w układach trójfazowych.

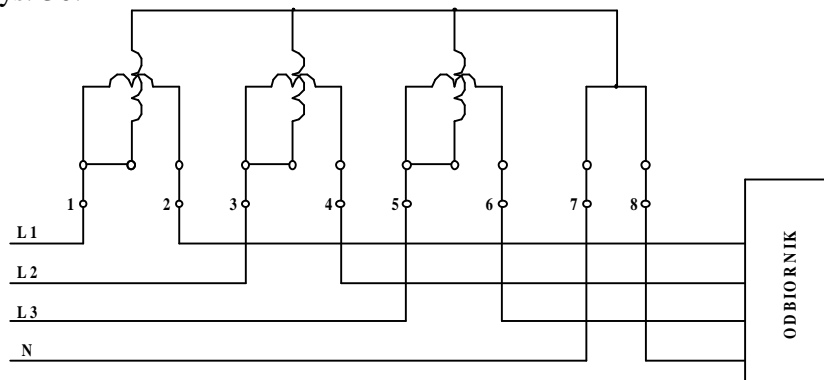
Liczniki przyłączane do sieci trójprzewodowej mają dwa ustroje pomiarowe działające na wspólną oś. W analogii do pomiaru mocy w układzie trójfazowym trójprzewodowym taki układ nazywamy układem Arona. Na rys 29 przedstawiony jest układ połączeń takiego licznika.



**Rys. 29.** Układ połączeń trójfazowego trójprzewodowego licznika energii czynnej o dwóch ustrojach pomiarowych [2]

Do zacisków 1, 3, 5 przyłącza się przewody od strony zasilania, a do zacisków 2, 4, 6 – przewody doprowadzające energię do odbiornika.

Do pomiaru energii w układach czteroprzewodowych mają zastosowanie liczniki o trzech ustrojach pomiarowych działających na wspólną oś licznika. Schemat połączeń takiego licznika pokazano na rys. 30.



**Rys. 30.** Układ połączeń licznika trójfazowego czteroprzewodowego o trzech ustrojach pomiarowych. [2]

Do zacisków 1, 3, 5 doprowadza się przewody fazowe układu zasilającego, a do zacisku 7 przewód neutralny. Zaciski 2, 4, 6 i 8 łączy się z instalacją odbiorczą.

Na każdym liczniku umieszczona jest tabliczka znamionowa, na której podane są m.in. znamionowe napięcie i jego częstotliwość, prąd oraz stała licznika  $C_L$ . Stała licznika określa liczbę obrotów tarczy licznika przy poborze energii równej 1 kWh. Na jej podstawie można określić pośrednio moc odbiorników przyłączonych do licznika:

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

Istnieją ponadto liczniki wielotaryfowe – najczęściej dwutaryfowe. Posiadają one dwa liczydła: liczydło dla taryfy dziennej i dla taryfy nocnej (energia pobierana w nocy ma niższą cenę). Produkowane są również liczniki specjalne z pomiarem mocy maksymalnej. Służą do określenia taryfy rozliczeniowej energii.

### **Pomiar energii biernej**

Do pomiaru energii biernej służą liczniki trójfazowe energii biernej, przystosowane do pomiaru przy nierównomiernym obciążeniu. Należy je włączać zgodnie z podanymi przez wytwórcę układami połączeń, zachowując kolejność faz L1, L2, L3.

Przy pomiarze energii biernej odbiornika trójfazowego symetrycznego w układzie trójprzewodowym może być zastosowany licznik jednofazowy przystosowany do pomiaru energii czynnej, którego cewkę prądową należy włączyć w dowolny przewód fazowy, a cewkę napięciową w pozostałe dwa przewody fazowe (na napięcie międzyfazowe). Wskazanie licznika należy pomnożyć przez  $\sqrt{3}$ . [1, 2].

## **4.5.2. Pytania sprawdzające**

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

1. Czym zasadniczo różni się budowa licznika do pomiaru energii elektrycznej w obwodach trójfazowych od licznika jednofazowego?
2. W jakich układach należy stosować liczniki trójfazowe?
3. W jaki sposób należy włączać cewki licznika trójfazowego do pomiaru energii czynnej?
4. W jakich układach należy stosować liczniki dwufazowe?
5. W jaki sposób należy włączać cewki licznika dwufazowego do pomiaru energii czynnej?

## **4.5.3. Ćwiczenia**

### **Ćwiczenie 1**

Zmierz licznikiem trójfazowym energię pobraną przez odbiornik trójfazowy w ciągu 5 minut. Na podstawie wskazań licznika określ moc tego odbiornika.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z danymi znamionowymi odbiornika,
- 2) zapoznać się z kartami katalogowymi liczników i dokonać wyboru właściwego licznika,
- 3) zapoznać się z instrukcją producenta,
- 4) zapoznać się z danymi licznika umieszczonymi na tarczy podziałkowej,
- 5) dokonać oględzin stanu technicznego licznika,
- 6) narysować układ pomiarowy (schemat licznika przerysować z instrukcji producenta),

- 7) sprawdzić brak napięcia w sieci zasilającej,
- 8) podłączyć do sieci zasilającej licznik i odbiornik zgodnie ze schematem, zachowując zasady bezpieczeństwa,
- 9) wykonać pomiary i zapisać wyniki,
- 10) obliczyć moc,
- 11) uzasadnić wybór licznika.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- karty katalogowe liczników,
- licznik trójfazowy do pomiaru energii czynnej,
- odbiornik trójfazowy (na przykład silnik indukcyjny klatkowy),
- woltomierz,
- zegarek.

## Ćwiczenie 2

Układ pomiarowy z ćwiczenia 1 odłączono od zasilania. Po ponownym załączeniu układu do tego samego napięcia tarcza licznika obraca się wolniej. Zlokalizuj i usuń usterkę w układzie.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) sprawdzić napięcie zasilające (za zgodą i w obecności nauczyciela),
- 2) odłączyć układ od napięcia zasilającego, sprawdzić brak istnienia napięcia,
- 3) dokonać oględzin układu,
- 4) zmierzyć rezystancje połączeń, przewodów, cewek licznika i uzwojeń silnika, zapisać wyniki pomiarów,
- 5) dokonać analizy wyników pomiarów i sformułować wnioski,
- 6) wskazać przyczynę niewłaściwej pracy układu pomiarowego,
- 7) usunąć usterkę,
- 8) sprawdzić działanie układu,
- 9) ocenić jakość wykonanej pracy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- licznik trójfazowy do pomiaru energii czynnej,
- odbiornik trójfazowy (na przykład silnik indukcyjny klatkowy),
- miernik uniwersalny AC/DC z funkcją pomiaru napięcia i rezystancji.

### 4.5.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

- |   | <b>Tak</b>               | <b>Nie</b>               |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 1) obliczyć energię czynną i bierną pobieraną przez odbiornik trójfazowy symetryczny i niesymetryczny?        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2) wymienić dane znamionowe licznika trójfazowego podawane przez producenta?                                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3) zaproponować właściwy sposób podłączenia licznika trójfazowego do pomiaru energii w linii trójprzewodowej? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

- 4) zaproponować właściwy sposób podłączenia licznika trójfazowego do pomiaru energii w linii czteroprzewodowej?
- 5) zlokalizować na podstawie pomiarów przyczynę niewłaściwego działania układu trójfazowego i usunąć ją?



## 5. SPRAWDZIAN OSIĄGNIĘĆ

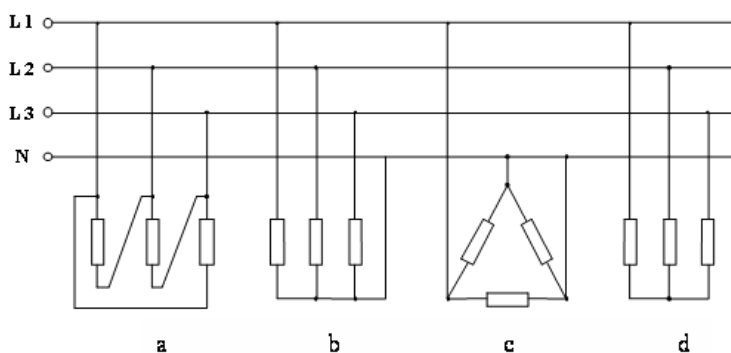
### INSTRUKCJA DLA UCZNIĄ

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

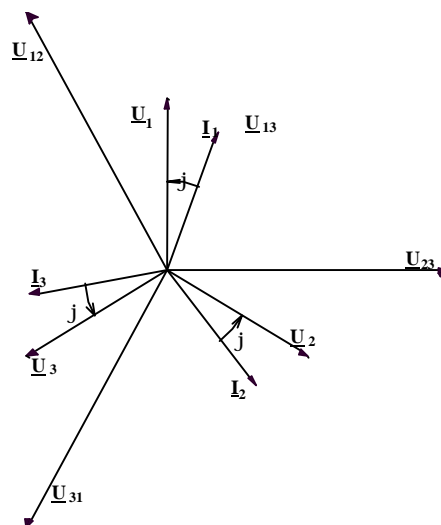
Powodzenia!

### ZESTAW ZADAŃ TESTOWYCH

1. W uzwojeniach fazowych prądnicy trójfazowej indukują się siły elektromotoryczne o jednakowej amplitudzie, ponieważ
  - a) prądnica posiada jedną magneśnicę.
  - b) uzwojenia wszystkich faz są identyczne.
  - c) uzwojenia wszystkich faz są przesunięte co  $120^\circ$ .
  - d) prądnica posiada jedną parę biegunów.
2. W trójkąt przyłączony do sieci trójfazowej jest odbiornik

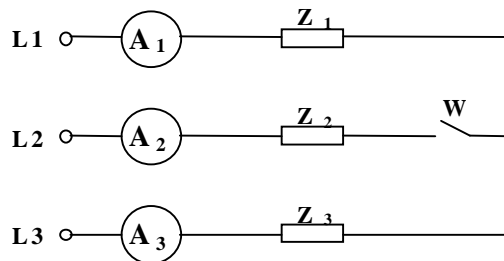


3. Dla odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w gwiazdę słuszne są zależności
- $U_f = U$  oraz  $I_f = I$ .
  - $U_f = \sqrt{3}U$  oraz  $I_f = I$ .
  - $U = \frac{U_f}{\sqrt{3}}$  oraz  $I = \frac{I_f}{\sqrt{3}}$ .
  - $U_f = \frac{U}{\sqrt{3}}$  oraz  $I_f = I$ .
4. Dla odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w trójkąt słuszne są zależności
- $U_f = U$  oraz  $I_f = I$ .
  - $U_f = \sqrt{3}U$  oraz  $I_f = I$ .
  - $U = U_f$  oraz  $I = \sqrt{3}I_f$ .
  - $U_f = \frac{U}{\sqrt{3}}$  oraz  $I_f = I$ .
5. Napięcie międzyfazowe w układzie symetrycznym gwiazdowym wynosi 230 V. Wartość napięcia fazowego wynosi
- 75 V.
  - 134 V.
  - 230 V.
  - 400 V.
6. Prąd fazowy symetrycznego odbiornika połączonego w trójkąt wynosi 2,3 A. Prąd przewodowy tego odbiornika ma wartość
- 6,9 A.
  - 4,6 A.
  - 4,0 A.
  - 2,3 A.
7. Na rysunku przedstawiono wykres wektorowy dla odbiornika trójfazowego symetrycznego

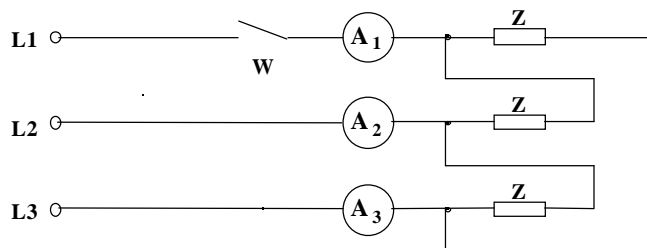


- indukcyjnego połączonego w gwiazdę.

- b) pojemnościowego połączonego w gwiazdę.  
 c) indukcyjnego połączonego w trójkąt.  
 d) pojemnościowego połączonego w trójkąt.
8. Do poprawnego pomiaru prądu przewodowego pobieranego przez silnik indukcyjny trójfazowy połączony w gwiazdę o impedancji jednej fazy  $Z = 50 \Omega$ , zasilany z sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym  $U = 400 \text{ V}$  należy użyć amperomierza o zakresie
- a) 30 A.  
 b) 20 A.  
 c) 5 A.  
 d) 1 A.
9. Do poprawnego pomiaru prądu przewodowego pobieranego przez silnik indukcyjny trójfazowy połączony w trójkąt o impedancji jednej fazy  $Z = 80 \Omega$ , zasilany z sieci o napięciu międzyfazowym  $U = 400 \text{ V}$  należy użyć amperomierza o zakresie
- a) 30 A.  
 b) 10 A.  
 c) 5 A.  
 d) 1 A.
10. Po dołączeniu zasilania z sieci trójfazowej do silnika indukcyjnego trójfazowego wirnik wiruje w kierunku przeciwnym do oczekiwanego. Jest to spowodowane
- a) przerwą w przewodzie zasilającym.  
 b) zwarcie dwóch faz.  
 c) zamianą kolejności faz napięć zasilających.  
 d) przerwą w uzwojeniu jednej fazy silnika.
11. Przy zamkniętym wyłączniku W amperomierze wskazują prądy:  $I_1 = I_2 = I_3$ . Po otwarciu wyłącznika

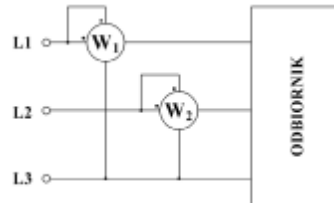


- a)  $I_1$  wzrośnie, a  $I_3$  zmaleje.  
 b)  $I_1$  i  $I_3$  nie ulegną zmianie.  
 c)  $I_1$  i  $I_3$  wzrosną.  
 d)  $I_1$  i  $I_3$  zmaleją.
12. Przy zamkniętym wyłączniku W amperomierze wskazują prądy:  $I_1 = I_2 = I_3$ . Po otwarciu wyłącznika
- a)  $I_2$  wzrośnie, a  $I_3$  zmaleje.  
 b)  $I_2$  i  $I_3$  nie ulegną zmianie.  
 c)  $I_2$  i  $I_3$  zmaleją.  
 d)  $I_2$  i  $I_3$  wzrosną.



13. Symetryczny odbiornik trójfazowy rezystancyjny połączony w gwiazdę przyłączono do sieci trójfazowej o napięciu  $U = 400 \text{ V}$ . W każdej fazie płynie prąd równy  $5 \text{ A}$ . Moc czynna tego odbiornika wynosi
- $P = 1,15 \text{ kW}$ .
  - $P = 3,45 \text{ kW}$ .
  - $P = 6 \text{ kW}$ .
  - $P = 18 \text{ kW}$ .
14. Moc czynną odbiornika trójfazowego symetrycznego obliczamy z zależności
- $P = \sqrt{3}U_f I_f \cos j$ .
  - $P = \sqrt{3}UI \cos j$ .
  - $P = UI \cos j$ .
  - $P = 3UI \cos j$ .
15. W wyniku pomiarów odbiornika symetrycznego połączonego w trójkąt ustalono, że: moc czynna tego odbiornika wynosi  $P = 1,2 \text{ kW}$ , napięcie międzyfazowe  $U = 400 \text{ V}$ , prąd fazowy  $I_f = 2 \text{ A}$ . Współczynnik mocy tego układu ma wartość
- 1,0.
  - 0,5.
  - 0,3.
  - 0,2.

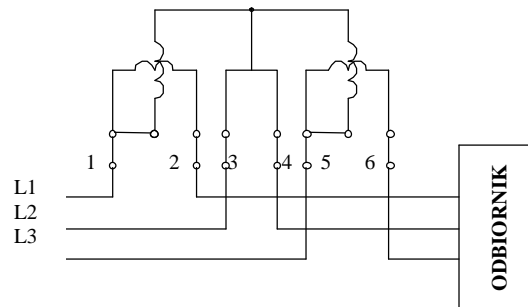
16. Przy pomiarze mocy czynnej odbiornika trójfazowego (w układzie jak na rysunku) do określenia mocy tego odbiornika należy posłużyć się zależnością ( $P_1, P_2$  – wskazania watomierzy)



- $P = P_1 + P_2$ .
  - $P = (P_1 + P_2) \cos j$ .
  - $P = \sqrt{3}(P_1 + P_2)$ .
  - $P = 3(P_1 + P_2)$ .
17. Moc bierną odbiornika z zadania 16 można określić na podstawie wskazań tak włączonych watomierzy z zależności:  $Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$ , gdy odbiornik trójfazowy jest
- niesymetryczny skojarzony w gwiazdę.
  - symetryczny skojarzony wyłącznie w gwiazdę.
  - niesymetryczny skojarzony w trójkąt.
  - symetryczny skojarzony w gwiazdę lub w trójkąt.
18. Układy trójfazowe **nie mają** zastosowania w
- domowych urządzeniach małej mocy.
  - silnikach dużej mocy.
  - transformatrach energetycznych.
  - prądnicach w elektrowniach.

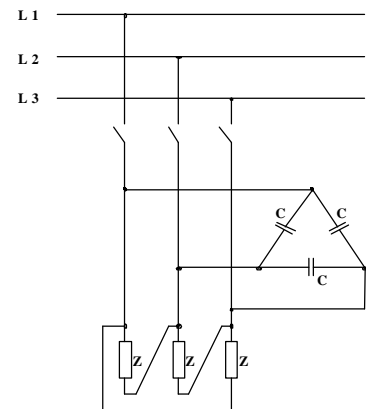
19. Rysunek przedstawia sposób włączenia

- licznika mierzącego energię pobieraną przez dwie fazy odbiornika trójfazowego.
- licznika mierzącego energię czynną pobieraną przez jedną fazę odbiornika trójfazowego w systemie dwutaryfowym.
- licznika mierzącego energię bierną odbiornika.
- licznika dwuustrojowego do pomiaru energii czynnej odbiornika trójfazowego.



20. Rolą kondensatorów włączonych do układu jak na rysunku jest

- zwiększenie współczynnika mocy układu.
- zwiększenie prądu fazowego odbiornika.
- zwiększenie prądu w linii zasilającej
- zmniejszenie współczynnika mocy układu.



## KARTA ODPOWIEDZI

Imię i nazwisko.....

### Obliczanie i pomiary parametrów obwodu prądu trójfazowego

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	
<b>Razem:</b>					

## 6. LITERATURA

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