



MINISTERSTWO EDUKACJI
i NAUKI

Teresa Birecka

Obliczanie i badanie obwodów prądu trójfazowego 311[08].O1.05

Poradnik dla ucznia

Wydawca

**Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy
Radom 2005**

Recenzenci:

mgr Arkadiusz Sadowski

mgr inż. Anna Tapolska

Opracowanie redakcyjne:

mgr inż. Katarzyna Maćkowska

Konsultacja:

dr Bożena Zając

Korekta:

mgr inż. Jarosław Sitek

Poradnik stanowi obudowę dydaktyczną programu jednostki modułowej „Obliczanie i badanie obwodów prądu trójfazowego” 311[08].O1.05 zawartego w modułowym programie nauczania dla zawodu technik elektryk.

Wydawca

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2005

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	3
2. Wymagania wstępne	4
3. Cele kształcenia	5
4. Materiał nauczania	6
4.1. Wytwarzanie napięć przemiennych trójfazowych. Podstawowe wielkości w układach trójfazowych	6
4.1.1. Materiał nauczania	6
4.1.2. Pytania sprawdzające	12
4.1.3. Ćwiczenia	13
4.1.4. Sprawdzian postępów	14
4.2. Połączenie odbiorników trójfazowych	15
4.2.1. Materiał nauczania	15
4.2.2. Pytania sprawdzające	22
4.2.3. Ćwiczenia	22
4.2.4. Sprawdzian postępów	26
4.3. Moc w układach trójfazowych. Poprawa współczynnika mocy	27
4.3.1. Materiał nauczania	27
4.3.2. Pytania sprawdzające	35
4.3.3. Ćwiczenia	36
4.3.4. Sprawdzian postępów	42
4.4. Pomiar energii elektrycznej w obwodach trójfazowych	43
4.4.1. Materiał nauczania	43
4.4.2. Pytania sprawdzające	45
4.4.3. Ćwiczenia	45
4.4.4. Sprawdzian postępów	46
5. Sprawdzian osiągnięć	47
6. Literatura	53

1. WPROWADZENIE

Poradnik będzie Ci pomocny w kształtowaniu umiejętności z zakresu obliczania i dokonywania 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 cztery części (rozdziały) obejmujące grupy zagadnień kształtujących umiejętności, które można wyodrębnić.

Każdy rozdział zawiera:

- pytania sprawdzające: zestaw pytań przydatny do sprawdzenia, czy już opanowałeś podane treści,
- ćwiczenia: pomogą ci zweryfikować wiadomości teoretyczne oraz ukształtować umiejętności praktyczne,
- 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, jak 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 stosuj poznane wcześniej zasady bezpieczeństwa.

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 i admitancji oraz obliczać moduły impedancji i admitancji,
- obliczać prądy, napięcia i moce w obwodach prądu sinusoidalnego,
- łączyć obwody elektryczne prądu przemiennego na podstawie ich schematów,
- dobierać przyrządy pomiarowe do wykonywania pomiarów w obwodach prądu przemiennego,
- mierzyć podstawowe wielkości elektryczne w obwodach prądu przemiennego,
- lokalizować i usuwać proste usterki w obwodach prądu przemiennego,
- stosować zasady bhp i ochrony ppoż. podczas pomiarów oraz pokazów zjawisk fizycznych.

3. CELE KSZTAŁCENIA

- W wyniku realizacji jednostki modułowej powinieneś umieć:
- wyjaśnić zjawisko powstawania napięć w prądnicach trójfazowych,
 - wymienić parametry sił elektromotorycznych fazowych wytwarzanych w prądnicach trójfazowych i podać zależności między nimi,
 - rozróżnić połączenie odbiornika trójfazowego w gwiazdę i w trójkąt,
 - rozróżnić napięcia fazowe i międzyfazowe oraz prądy fazowe i przewodowe w układach połączonych w gwiazdę i w trójkąt,
 - zinterpretować wykresy wektorowe układów trójfazowych,
 - obliczyć prądy, napięcia i moce dla odbiornika symetrycznego i niesymetrycznego,
 - dobrać przyrządy pomiarowe do wykonania pomiarów w obwodach prądu przemiennego trójfazowego,
 - połączyć obwody trójfazowe na podstawie ich schematów,
 - zmierzyć prądy, napięcia i moce w obwodach trójfazowych,
 - zmierzyć energię dostarczaną do odbiornika trójfazowego,
 - zanalizować pracę obwodów trójfazowych na podstawie wyników obliczeń lub pomiarów,
 - wskazać przykłady wykorzystania układów trójfazowych,
 - zlokalizować i usunąć usterki w układach elektrycznych trójfazowych,
 - opracować wyniki pomiarów z wykorzystaniem programów komputerowych,
 - zastosować zasady bhp i ochrony ppoż. na stanowisku pomiarowym.

4. MATERIAŁ NAUCZANIA

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

4.1.1. Materiał nauczania

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

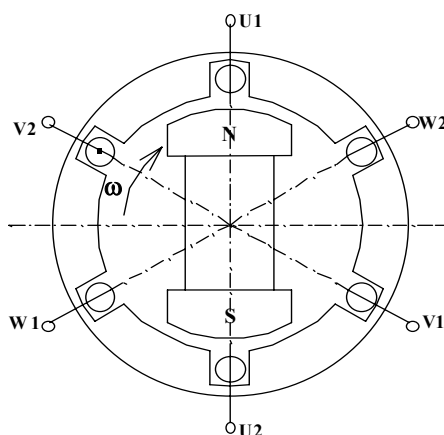
Układ wielofazowy jest układem symetrycznym, jeżeli wszystkie napięcia tego układu mają jednakowe wartości skuteczne (lub amplitudy) i są względem siebie przesunięte w fazie o taki sam kąt.

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°).

Układy trójfazowe są powszechnie stosowane w energetyce 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 magniesnicy i wirujący ze stałą prędkością kątową ω . Magniesnice 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°). 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 [w oparciu o 1]

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

Podczas ruchu magniesnicy ze stałą prędkością kątową ω 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°), 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:

$$e_u = E_m \sin \omega t$$

$$e_u = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$e_u = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

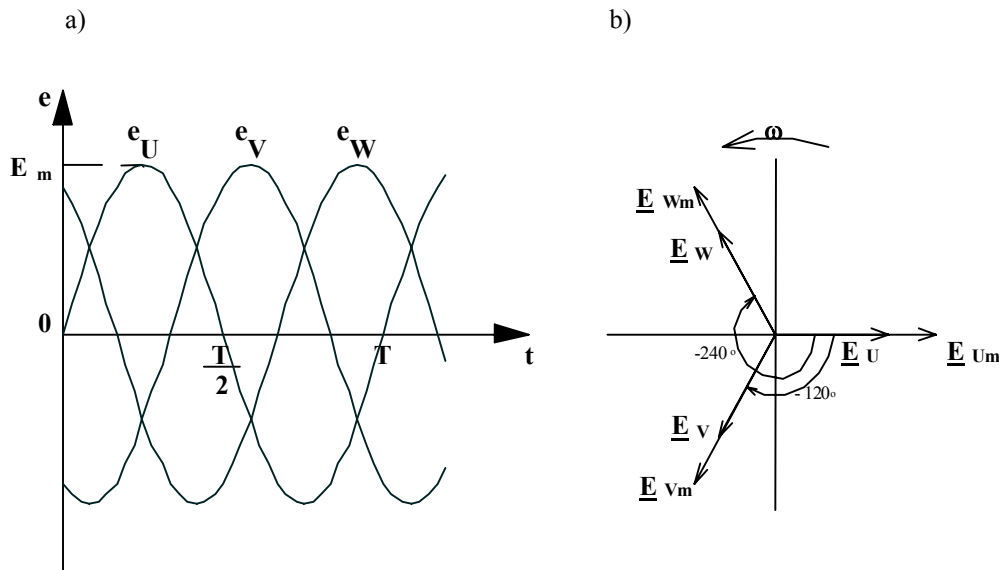
E_m – amplitudy sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach każdej fazy.

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 [w oparciu o 1]

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

Układ połączeń w gwiazdę

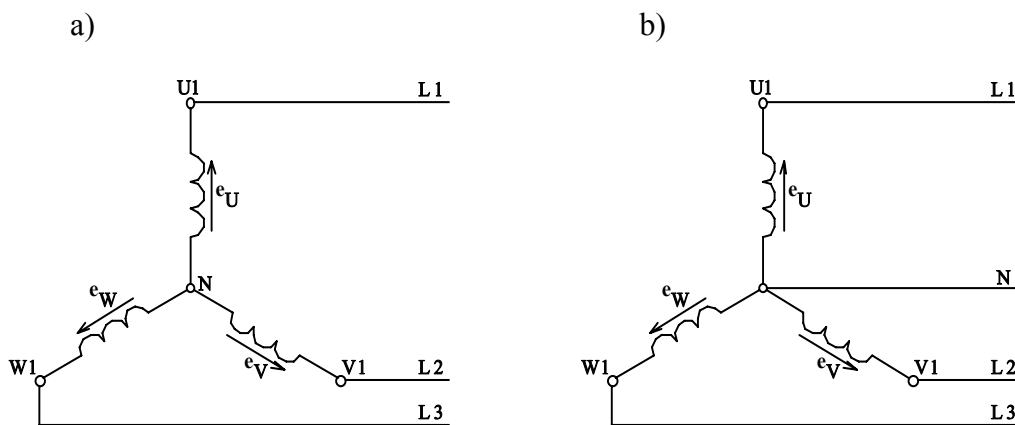
Układ połączeń w gwiazdę może być trójprzewodowy (stosowany w prądnicach wysokiego napięcia) lub czteroprzewodowy (rys. 3).

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.

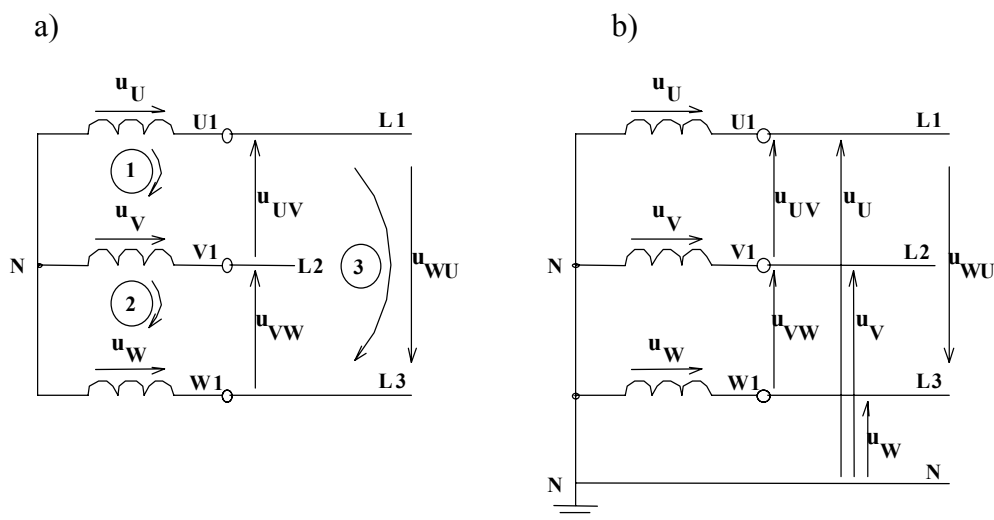
Napięcia między dowolnym przewodem fazowym a punktem neutralnym nazywamy napięciami fazowymi i oznaczamy je przez: u_U, u_V, u_W – wartości chwilowe oraz U_U, U_V, U_W – wartości skuteczne.



Rys. 3. Układ połączeń uzwojeń prądnicy w gwiazdę: a) trójprzewodowy; b) czteroprzewodowy [w oparciu o 1]

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 [1]

Korzystając z drugiego prawa Kirchhoffa można ułożyć dla oczek zaznaczonych na rys. 4 następujące równania:

Oczko 1: $u_U - u_{UV} - u_V = 0$ stąd: $u_{UV} = u_U - u_V$

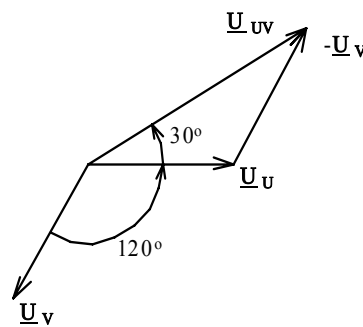
Oczko 2: $u_V - u_{VW} - u_W = 0$ stąd: $u_{VW} = u_V - u_W$

Oczko 3: $u_U + u_{WU} - u_W = 0$ 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 ω odpowiada odejmowanie opisujących je wektorów.

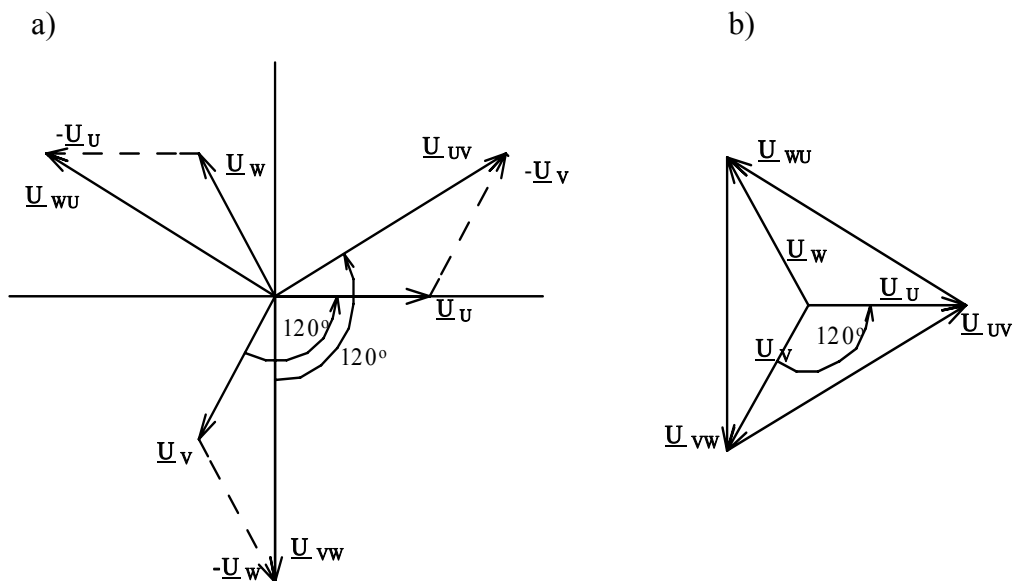
Na rys. 5 pokazany jest sposób wyznaczania napięcia międzyfazowego.



Rys. 5. Wyznaczanie napięcia międzyfazowego w układzie gwiazdowym. [w oparciu o 1]

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

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



Rys 6. Wykres wektorowy napięć fazowych i międzyfazowych: a) przedstawienie działania na wektorach, b) powszechny sposób rysowania wektorów napięć fazowych i międzyfazowych [w oparciu o 1]

Wektory napięć fazowych $\underline{U}_U, \underline{U}_V, \underline{U}_W$, tworzą układ symetryczny napięć o jednakowych wartościach skutecznych U_f , przesuniętych względem siebie kolejno o kąt 120° .

Również wektory napięć międzyfazowych $\underline{U}_{UV}, \underline{U}_{VW}, \underline{U}_{WU}$, tworzą układ symetryczny. Wartości skuteczne napięć międzyfazowych w układzie symetrycznym są sobie równe. Oznaczamy je U_p .

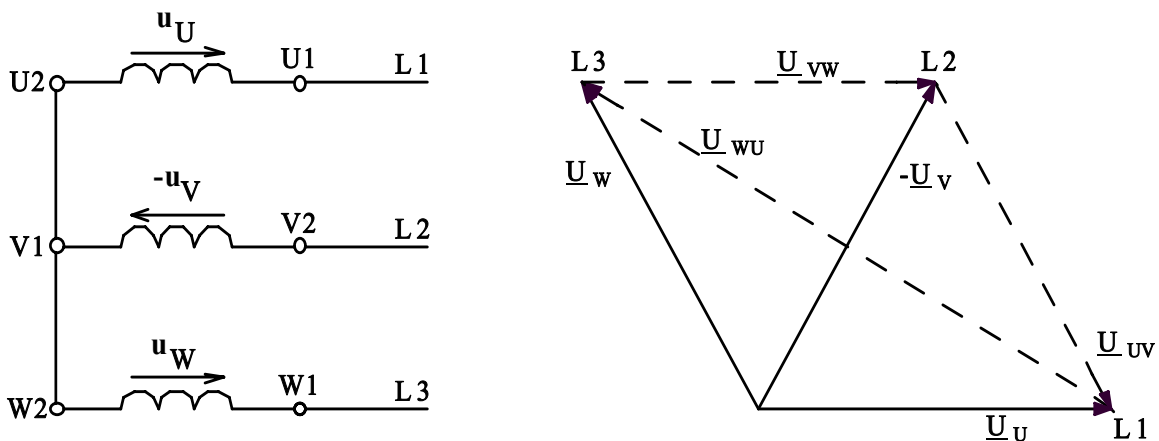
Przesuwając równolegle wektory napięć międzyfazowych (bez zmiany ich kierunku, zwrotu i długości) otrzymujemy trójkąt napięć międzyfazowych, którego wierzchołki wyznaczone są przez wektory napięć fazowych (rys. 6.b).

Dwa kolejne napięcia fazowe i odpowiednie napięcie międzyfazowe tworzą trójkąt równoramienny. Wykorzystując funkcje trygonometryczne można wyprowadzić zależność:

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

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

Nieprawidłowe połączenie uzwojeń prądnicy skutkuje brakiem symetrii napięć. Brak symetrii wystąpi, gdy w jednej z faz zostanie zamieniony początek z końcem uzwojenia fazowego. Ilustruje to rys. 7.

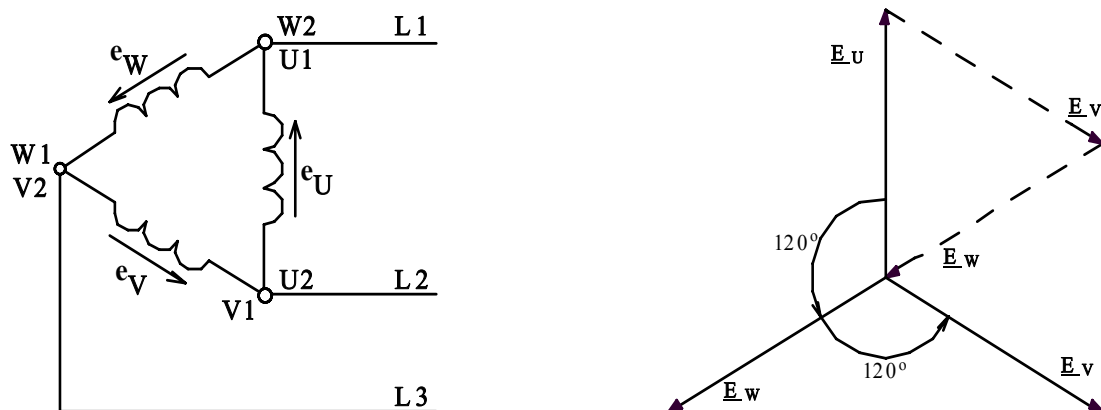


Rys. 7. Nieprawidłowe połączenie uzwojeń prądnicy w gwiazdę: a) zamienione zaciski fazy V (L2); b) wykres wektorowy [2]

W tym przypadku brak symetrii powoduje, że $U_{UV} = U_{VW} = U_f$, a tylko napięcie $U_{WU} = U_p$

Układ połączeń 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.



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

Takie połączenie nazywamy połączeniem w trójkąt (rys. 8).

W tak utworzonym oczku działają siły elektromotoryczne fazowe e_U, e_V, e_W poszczególnych faz, które są jednocześnie siłami elektromotorycznymi międzyfazowymi. Ich suma w każdej chwili jest równa zero (porównaj rys. 2.). Ich wektory $\underline{E}_U, \underline{E}_V, \underline{E}_W$, tworzą układ symetryczny (rys. 8.b). Dodając te wektory otrzymujemy:

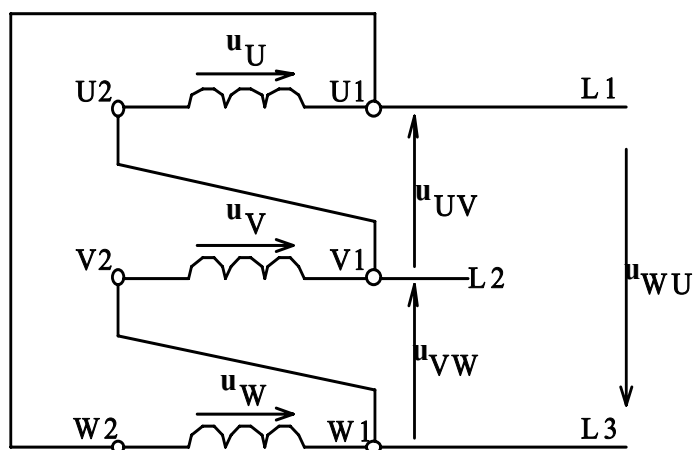
$$\underline{E}_U + \underline{E}_V + \underline{E}_W = 0$$

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

Stosowany w praktyce schemat połączeń w trójkąt przedstawia rys. 9.

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

$$U_p = U_f$$

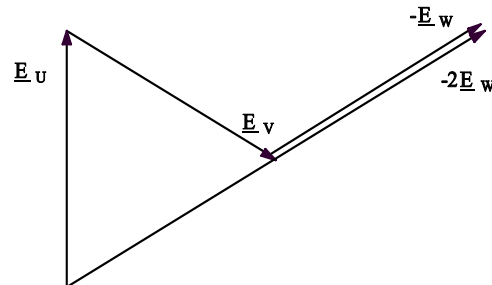


Rys. 9. Powszechnie stosowany sposób oznaczania napięć w układzie trójkątowym [w oparciu o 1]

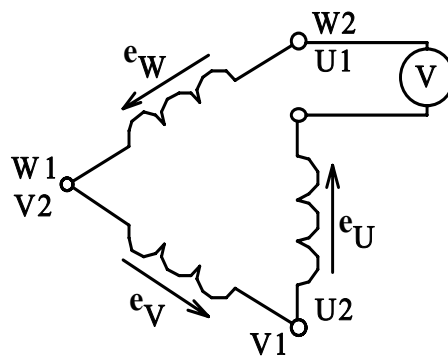
Ponieważ układ połączeń w trójkąt jest układem trójprzewodowym, więc mamy do

dyspozycji tylko napięcia międzyfazowe.

Również w przypadku połączenia uzwojeń prądnicy w trójkąt może wystąpić brak symetrii napięć, gdy w jednej z faz zostanie zamieniony początek z końcem uzwojenia fazowego. Na rysunku 10 przedstawiono wykres wektorowy w przypadku zamiany początku i końca uzwojenia pierwszej fazy.



Rys. 10. Wykres wektorowy przy nieprawidłowym połączeniu uzwojeń prądnicy w trójkąt (zamienione zaciski W1-W2 (fazy3) [2]



Rys. 11. Pomiar napięcia na zaciskach otwartego trójkąta [w oparciu o 2]

W tym przypadku suma wektorowa jest różna od zera: $\underline{E}_U + \underline{E}_V + (-\underline{E}_W) = -2\underline{E}_W$.

W oczku pojawiłaby się siła elektromotoryczna o wartości skutecznej równej $2E_f$, co spowodowałoby przepływ niebezpiecznego prądu wyrównawczego w obwodzie.

Aby tego uniknąć należy przed zamknięciem uzwojenia w trójkąt sprawdzić woltomierzem prawidłowość połączeń (rys. 11). Przy prawidłowym połączeniu woltomierz powinien wskazać zero. [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, 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 skojarzonej 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
- 11) Czy zamiana początku z końcem uzwojenia jednej fazy wpływa na symetrię napięć prądnicy?

4.1.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Określ i wykreśl 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 p.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:

- linijka,
- kątomierz,
- kalkulator.

Ćwiczenie 2

Oblicz wartości napięć między zaciskami prądnicy, której uzwojenia skojarzono 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 p.4 (w przyjętej skali) wykres napięć,
- 6) zmierzyć długości wektorów napięć międzyfazowych i podać wartość modułów poszczególnych napięć międzyfazowych.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- linijka,
- kątomierz,
- kalkulator.

4.1.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) wyjaśnić zjawisko powstawania napięć w prądniczy trójfazowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) zapisać równania na wartości chwilowe sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach prądniczy trójfazowej symetrycznej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) scharakteryzować sposoby łączenia uzwojeń fazowych prądniczy trójfazowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) narysować wykresy sił elektromotorycznych dla prądniczy symetrycznej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) narysować i oznaczyć uzwojenia prądniczy i zaciski prądniczy symetrycznej połączonej w gwiazdę?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) nazwać i określić napięcia na zaciskach trójfazowej nieobciążonej prądniczy połączonej w gwiazdę?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) określić zależność między napięciami fazowymi i międzyfazowymi dla prądniczy połączonej w gwiazdę?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) narysować i oznaczyć uzwojenia prądniczy i zaciski prądniczy symetrycznej połączonej w trójkąt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) określić zależność między napięciami fazowymi i międzyfazowymi dla prądniczy połączonej w trójkąt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) narysować wykres napięć dla nieobciążonej prądniczy trójfazowej symetrycznej połączonej w trójkąt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) wyjaśnić przyczyny braku symetrii napięć w prądniczy trójfazowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12) określić wykreślnie (przy pomocy działań na wektorach) wartości napięć prądniczy w przypadku braku symetrii?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.2. Połączenie odbiorników trójfazowych

4.2.1. Materiał nauczania

Z sieci trójfazowych można zasiląć 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. Dołączając odbiorniki jednofazowe (między jeden z przewodów fazowych i przewód neutralny) należy pamiętać o równomiernym obciążeniu poszczególnych faz.

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.

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

Odbiorniki trójfazowe można kojarzyć w gwiazdę lub w trójkąt.

Odbiornik połączony w gwiazdę

Połączenia odbiornika trójfazowego w gwiazdę i przyłączenie go do zacisków sieci pokazano na rys. 12.

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.

Prądy płynące w przewodach linii, za pomocą których wyprowadzamy energię ze źródła, nazywamy prądami przewodowymi (albo liniowymi).

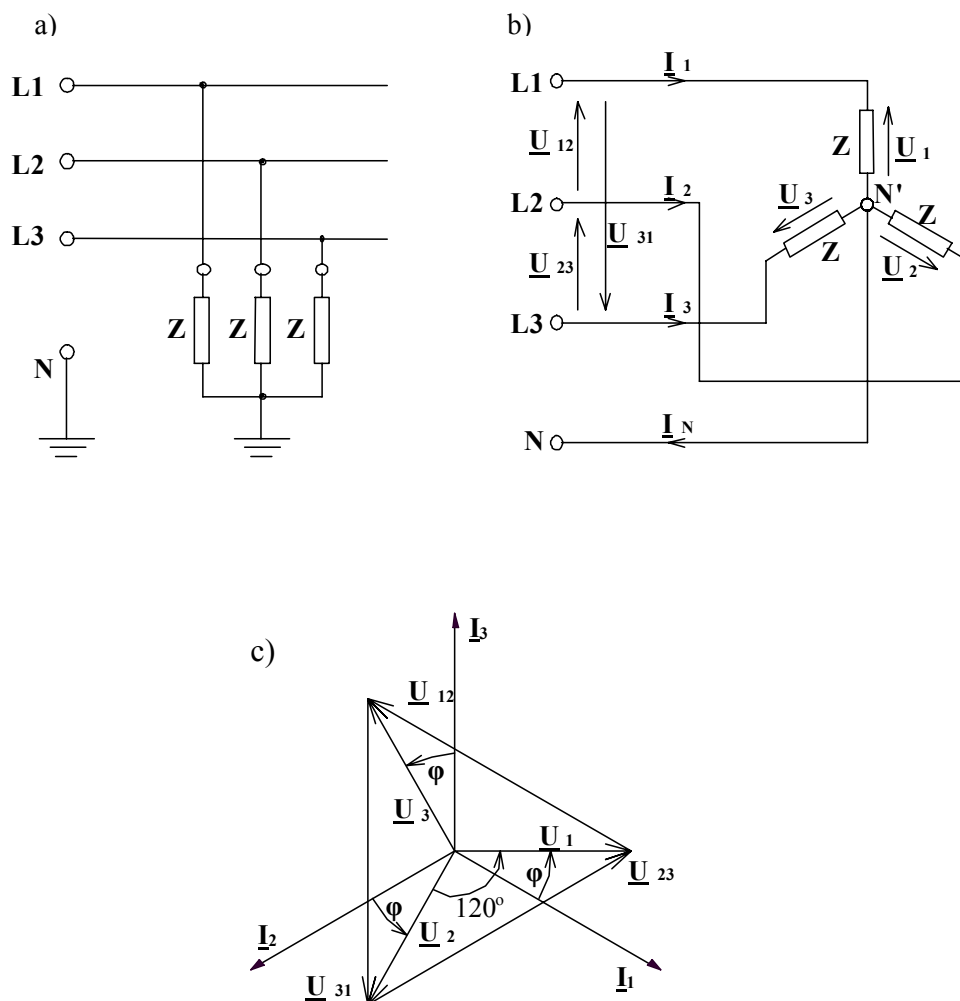
W układzie połączeń w gwiazdę prądy przewodowe są równe prądom fazowym.

W przewodzie neutralnym płynie prąd:

$$i_N = i_1 + i_2 + i_3$$

którego wartość chwilowa jest równa sumie wartości chwilowych prądów fazowych. Słuszna jest zatem także zależność dotycząca wielkości wektorowych:

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



Rys. 12. 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° . 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 12b 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 φ . W przypadku odbiornika rezystancyjnego kąt φ 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:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_f; \quad U_{12} = U_{23} = U_{31} = U_p$$

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

oraz:

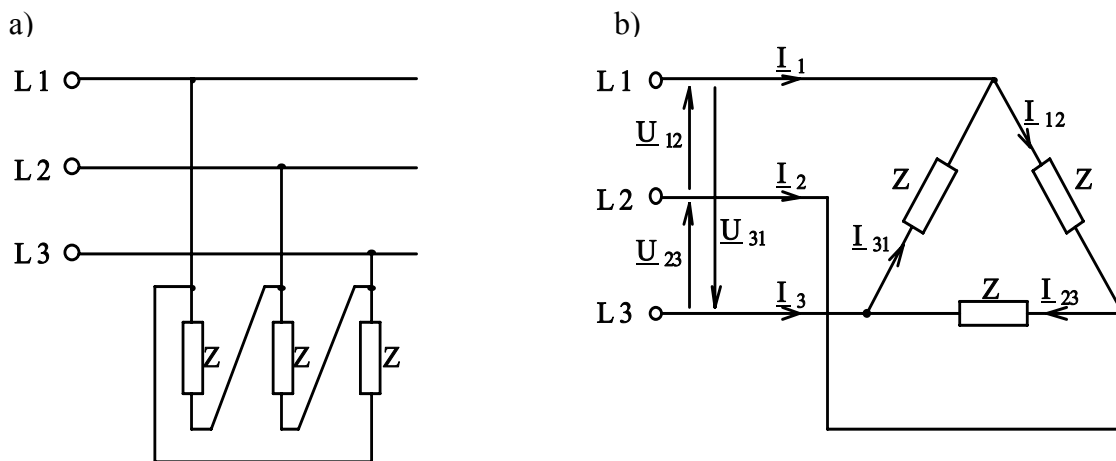
$I_p = I_f$ – prądy przewodowe równe są prądom płynącym w fazach odbiornika

$U_p = \sqrt{3}U_f$ – napięcia międzyfazowe są $\sqrt{3}$ razy większe od napięć na fazach odbiornika.

Często pomija się indeksy przy prądzie przewodowym i napięciu międzyfazowym i oznacza się je po prostu jako I i U .

Odbiornik symetryczny połączony w trójkąt

Odbiornik połączony w trójkąt przyłączamy do trzech przewodów fazowych sieci w sposób pokazany na rys. 13.



Rys. 13. 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:

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

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

We wszystkich fazach odbiornika płyną prądy, które są przesunięte względem siebie o $2\pi/3$ rad (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:

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

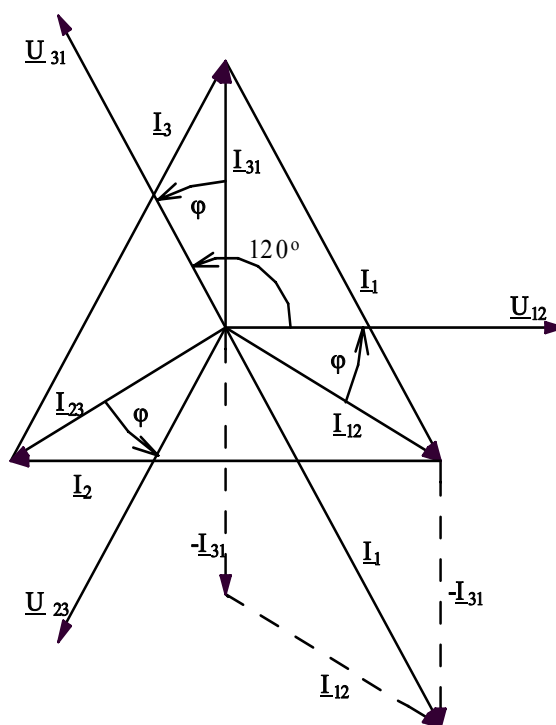
$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}$$

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

Moduły prądów przewodowych (liniowych) są sobie równe, a suma ich wektorów jest równa zero (zależności te pokazane są na rys. 14):

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_p$$

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



Rys. 14. Wykres wektorowy prądów i napięć dla odbiornika trójfazowego symetrycznego połączonego w trójkąt [w oparciu o1]

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:

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

Pomiarów prądów i napięć w obwodach trójfazowych dokonujemy za pomocą mierników o ustroju elektromagnetycznym, włączając je do obwodu bezpośrednio lub poprzez przekładniki.

Układy trójfazowe niesymetryczne

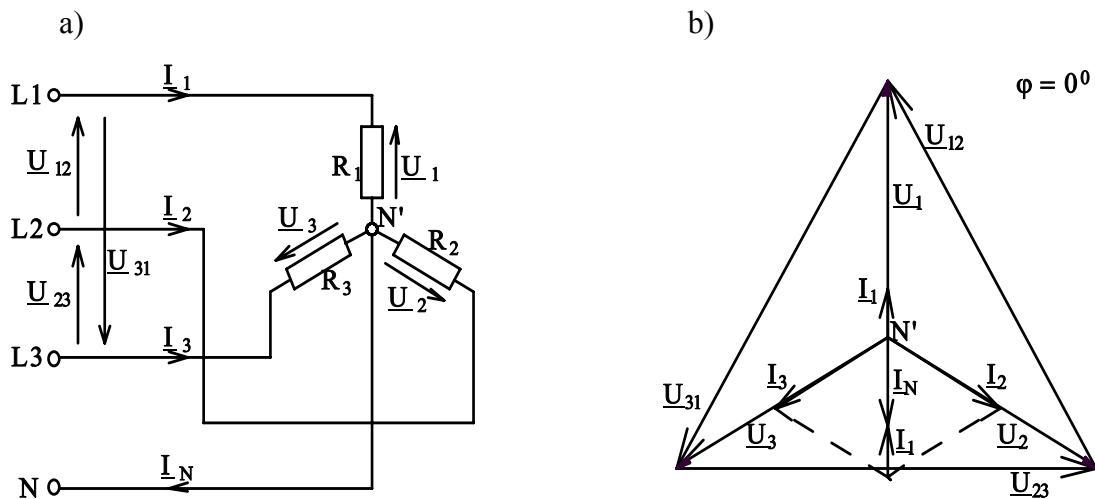
Układ trójfazowy nazywamy niesymetrycznym, jeżeli niesymetryczne jest źródło albo odbiornik bądź oba te obwody. Asymetria źródła polega na tym, że napięcia źródłowe nie tworzą symetrycznej gwiazdy (na skutek nierówności napięć generowanych w poszczególnych uzwojeniach albo różnych przesunięć fazowych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

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

Rozpatrzmy różne przypadki asymetrii dla odbiornika rezystancyjnego.

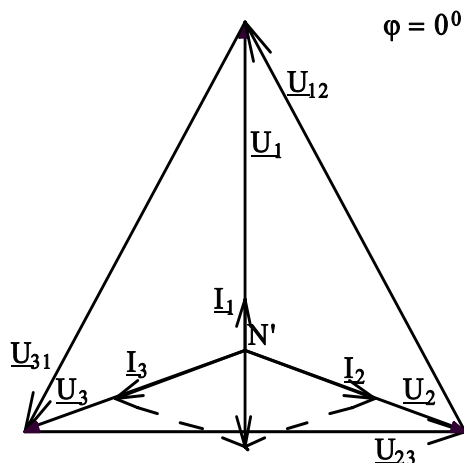
Odbiornik połączony w gwiazdę (rys 15):

- odbiornik połączony w gwiazdę, faza pierwsza obciążona mniejszym prądem ($R_1 > R_2 = R_3$), dołączony do symetrycznej sieci czteroprzewodowej. Wykres wektorowy ilustruje rys. 15a. Z wykresu 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.



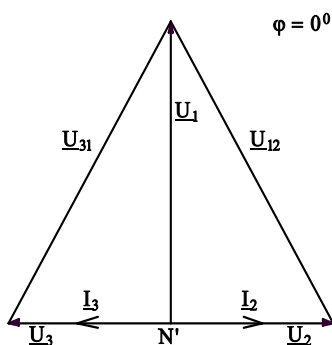
Rys. 15. Niesymetryczny odbiornik połączony w gwiazdę: a) układ połączeń, b) wykres wektorowy dla linii czteroprzewodowej [1]

- 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°). 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.



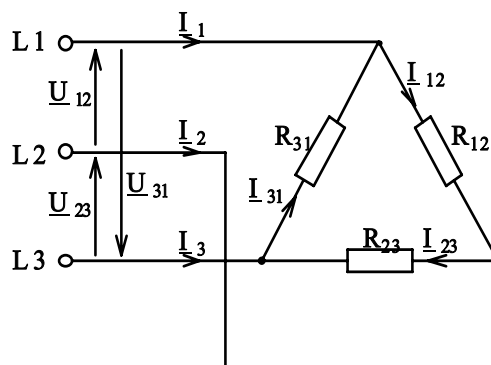
Rys. 16. Wykres dla odbiornika o różnych rezystancjach fazowych przyłączonego do sieci trójprzewodowej [w oparciu o 1]

- odbiornik jak na rys.15a w przypadku przerwy w fazie pierwszej ($R_1 = \infty, R_2 = R_3$), linia trójprzewodowa. W fazie pierwszej prąd nie płynie, a R_2 i R_3 są połączone szeregowo i włączone do napięcia międzyfazowego. Rozkład prądów i napięć fazowych niesymetryczny – rys. 17.



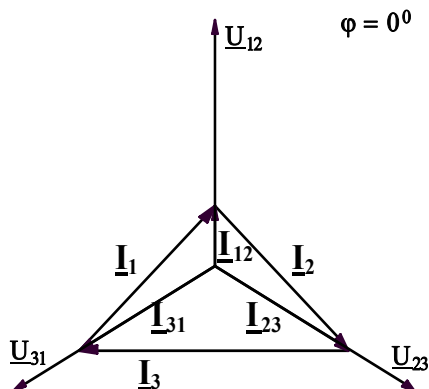
Rys. 17. Wykres dla przypadku przerwy w jednej fazie odbiornika połączonego w gwiazdę [źródło własne]

Odbiornik niesymetryczny połączony w trójkąt. Schemat odbiornika przedstawia rys. 18.



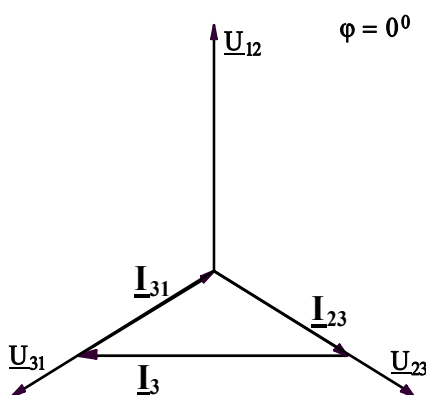
Rys. 18. Schemat odbiornika trójfazowego niesymetrycznego połączonego w trójkąt [w oparciu o 1]

- zakładamy, że: $R_{12} \neq R_{23} = R_{31}$, 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° , ponieważ napięcia doprowadzone do poszczególnych faz odbiornika są przesunięte o 120° (rys. 19)



Rys. 19. Wykres wektorowy dla odbiornika niesymetrycznego (różne rezystancje fazowe) połączonego w trójkąt [źródło własne]

- 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 zmaleły i są równe prądom fazowym (rys. 20)



Rys. 20. Wykres wektorowy dla odbiornika rezystancyjnego połączonego w trójkąt w przypadku przerwy w jednej gałęzi odbiornika [źródło własne]

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 wykonać pomiary wszystkich prądów i napięć. Analiza wyników pomiarów może być wskazówką do ustalenia rodzaju uszkodzenia układu.

Przy pomiarze prądów i napięć o znacznej wartości mierniki włączamy 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) Jak obliczyć prąd płynący w przewodzie neutralnym przy braku symetrii odbiornika?
- 8) Jaką rolę pełni przewód neutralny?
- 9) Czy w przewodzie neutralnym wolno instalować bezpieczniki?
- 10) W jaki sposób mierzymy prądy w odbiornikach trójfazowych symetrycznych i niesymetrycznych?
- 11) W jaki sposób dokonujemy pomiaru napięć odbiorników trójfazowych?
- 12) 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) stosując oznaczenia przyjęte w narysowanym schemacie podaj zależności między napięciami fazowymi i międzyfazowymi oraz prądami fazowymi i przewodowymi odbiornika,
- 4) narysować wykres wektorowy dla tego układu, przy założeniu, że odbiornik ma charakter pojemnościowy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- linijka,
- 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) stosując oznaczenia przyjęte w narysowanym schemacie podać zależności między napięciami fazowymi i międzyfazowymi oraz prądami fazowymi i przewodowymi odbiornika,
- 4) narysować wykres wektorowy dla tego układu, przy założeniu, że odbiornik ma charakter indukcyjny.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- linijka,
- 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:

- linijka,
- 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: $1\text{ cm} \rightarrow 50\text{ V}$, $1\text{ cm} \rightarrow 0,5\text{ A}$,
- 5) porównać prąd przewodowy tego odbiornika i odbiornika z ćwiczenia poprzedniego (parametry odbiornika i sieci zasilającej te same, inny sposób skojarzenia odbiornika). porównania dokonać na podstawie obliczeń i wykresów,
- 6) sformułować wnioski.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- linijka,
- 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: $1\text{ cm} \rightarrow 50\text{ V}$, $1\text{ cm} \rightarrow 0,5\text{ A}$,
- 5) podać wartość prądu w przewodzie neutralnym.

Wyposażenie stanowiska pracy:

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

Ćwiczenie 6

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):
 - oszacować wartości prądów i napięć,

- dobrać mierniki odpowiedniego rodzaju i o właściwych zakresach,
 - przed przyłączeniem układu do sieci zasilającej sprawdzić w bezpieczny sposób brak napięcia na zaciskach fazowych,
- 2) przygotować tabelę do zapisania wyników pomiarów,
 - 3) zgłosić nauczycielowi gotowość wykonywania pomiarów,
 - 4) 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 ($R_d = \infty$),
 - 5) powtórzyć pomiary dla tych przypadków, gdy odbiornik jest przyłączony do linii trójprzewodowej (przerwa w przewodzie neutralnym),
 - 6) zanalizować wyniki pomiarów,
 - 7) 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,
- woltomierz i przełącznik woltomierzowy lub odpowiednia ilość woltomierzy,
- rezystor laboratoryjny,
- wyłączniki jednofazowe, wyłącznik trójfazowy.

Ćwiczenie 7

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 odbiornika wywołany dodatkową rezystancją R_d 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 (opracowanym w ramach pracy domowej i zatwierdzonym przez nauczyciela):
 - oszacować wartości prądów i napięć,
 - dobrać mierniki odpowiedniego rodzaju i o właściwych zakresach,
 - przed przyłączeniem układu do sieci zasilającej sprawdzić w bezpieczny sposób brak napięcia na zaciskach fazowych,
- 2) przygotować tabelę do zapisania wyników pomiarów,
- 3) zgłosić nauczycielowi gotowość wykonywania pomiarów,
- 4) wykonać pomiary napięć i prądów i zapisać wyniki dla odbiornika przy symetrycznym zasilaniu dla przypadków:
 - odbiornik symetryczny ($R_d = 0$),
 - odbiornik niesymetryczny ($R_d > 0$),
 - odbiornik niesymetryczny – przerwa w przewodzie fazowym ($R_d = \infty$),
- 5) powtórzyć pomiary dla tych przypadków przy asymetrii zasilania (przerwa w przewodzie zasilającym – symulacja wyłącznikiem),
- 6) zanalizować wyniki pomiarów,

7) sformułować i zapisać wnioski dotyczące wpływu asymetrii na wartości prądów i napięć.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat połączeń (opracowany w ramach pracy domowej i zatwierdzony przez nauczyciela),
- odbiornik trójfazowy symetryczny z możliwością połączenia w trójkąt,
- amperomierze,
- woltomierz i przełącznik woltomierzowy lub odpowiednia ilość woltomierzy,
- rezystor laboratoryjny,
- wyłączniki jednofazowe, wyłącznik trójfazowy.

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 niesymetrycznego o różnych obciążeniach poszczególnych faz?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) narysować wykres wektorowy dla odbiornika symetrycznego w przypadku przerwy w jednym przewodzie doprowadzającym energię?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) zmierzyć prądy i napięcia w układzie trójfazowym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) dobrać mierniki właściwego rodzaju i o odpowiednich zakresach do pomiarów prądów i napięć?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12) określić przyczynę nieprawidłowego działania układu trójfazowego na podstawie wyników pomiarów?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13) przewidzieć niebezpieczeństwo mogące wystąpić przy wykonywaniu pomiarów i zapobiec mu?	<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:

$$P = U_{1f} I_{1f} \cos \varphi_1 + U_{2f} I_{2f} \cos \varphi_2 + U_{3f} I_{3f} \cos \varphi_3$$

U_{1f}, U_{2f}, U_{3f} – napięcia fazowe, I_{1f}, I_{2f}, I_{3f} – prądy fazowe, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – przesunięcia fazowe.

Dla układu symetrycznego:

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

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

– gwiazdowego: $U_f = \frac{U_p}{\sqrt{3}}, \quad I_p = I_f;$

– trójkątowego: $U_p = U_f, \quad I_f = \frac{I_p}{\sqrt{3}}.$

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

$$P = \sqrt{3} U_p I_p \cos \varphi$$

Pomijając indeksy przy napięciach międzyfazowych i prądach przewodowych, moc czynna odbiornika trójfazowego symetrycznego zapisujemy:

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

Moc bierna

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

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = U_{1f} I_{1f} \sin \varphi_1 + U_{2f} I_{2f} \sin \varphi_2 + U_{3f} I_{3f} \sin \varphi_3$$

W układzie symetrycznym:

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

Moc pozorna

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

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

Pomiar mocy czynnej w układach trójfazowych

Do pomiaru mocy czynnej odbiornika służą watomierze. Watomierz posiada dwie cewki: prądową i napięciową. Początki obu cewek są zaznaczone na obudowie. 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.

1. Pomiar mocy w układzie trójfazowym czteroprzewodowym:

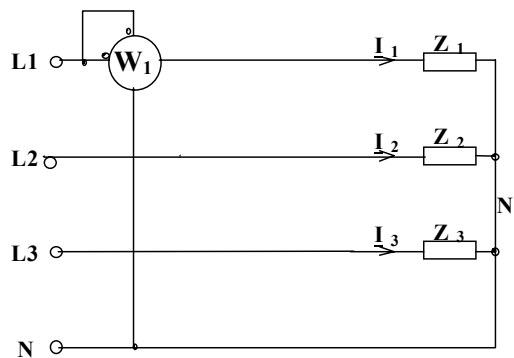
- a) Układ symetryczny – odbiornik połączony w gwiazdę – jeden watomierz, którego cewka prądowa jest włączona tak, aby płynął przez nią prąd fazowy, a cewka napięciowa włączona na napięcie fazowe (rys. 21). Watomierz mierzy moc:

$$P_1 = U_f I_f \cos \varphi_f .$$

Moc takiego odbiornika:

$$P = 3P_1$$

P_1 – wskazanie watomierza

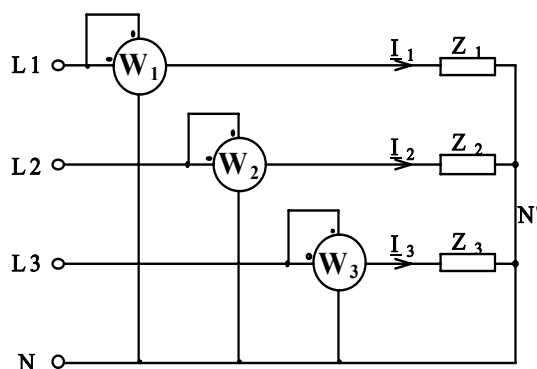


Rys 21. Pomiar mocy odbiornika trójfazowego symetrycznego w układzie czteroprzewodowym [w oparciu o1]

- b) 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

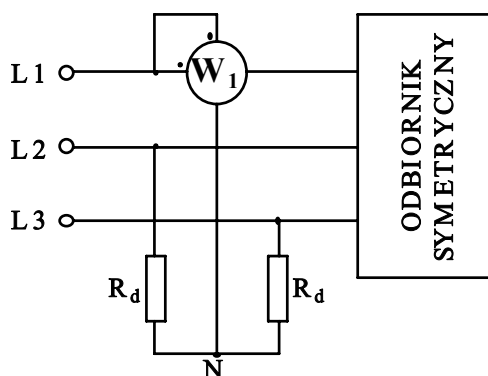


Rys. 22. Pomiar mocy odbiornika trójfazowego niesymetrycznego [w oparciu o 1]

2. Pomiar mocy w układzie trójfazowym trójprzewodowym.

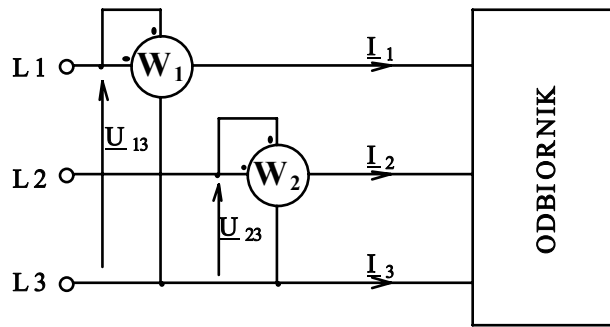
- a) Układ symetryczny: bez względu na sposób połączenia odbiornika (w gwiazdę lub w trójkąt) – jeden watomierz z dodatkowym układem rezystorów do utworzenia sztucznego punktu neutralnego (rys.23). R_d – tak dobrane rezystancje dodatkowe, aby w fazie, w której jest włączona cewka napięciowa watomierza, rezystancja wypadkowa była równa rezystancji włączanej do każdej z faz dodatkowych. 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 odbiornika trójfazowego symetrycznego w układzie trójprzewodowym. [w oparciu o 1]

- b) 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 amperometry włączone są szeregowo w dwie dowolne fazy, początki cewek napięciowych włączone są między te fazy i fazę wolną.



Rys. 24. Pomiar mocy odbiornika trójfazowego dwoma watomierzami (układ Arona) [w oparciu o 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. 25.

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:

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

Różnica napięć chwilowych dwóch faz jest równa napięciu międzyfazowemu:

$$u_1 - u_2 = u_{12}, \quad u_2 - u_3 = u_{23}$$

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

$$p = u_{12} i_1 + u_{23} i_2$$

Przez cewkę prądową watomierza W_1 płynie prąd i_1 , a cewka napięciowa jest włączona na napięcie u_{12} . Watomierz mierzy wartość średnią P_1 iloczynu $u_{12} i_1$. Odpowiednio watomierz W_2 mierzy wartość średnią P_2 . Dwa watomierze mierzą moc w całym układzie:

$$P = P_1 + P_2,$$

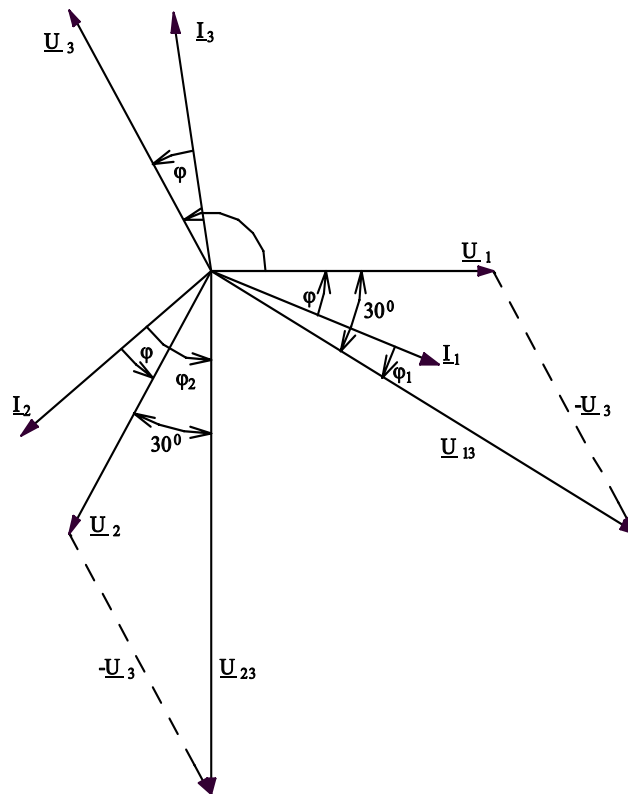
gdzie: $P_1 = U_{12} I_1 \cos \varphi_1$,

$$P_2 = U_{23} I_2 \cos \varphi_2,$$

φ_1 – kąt pomiędzy napięciem U_{12} , a prądem I_1 ,

φ_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 do objaśnienia pomiaru mocy dwoma watomierzami. [1]

Z wykresu widać, że: $\varphi_1 = \varphi - 30^\circ$, $\varphi_2 = \varphi + 30^\circ$

Przy tak włączonych watomierzach jak na rysunku, jeżeli kąt φ będzie mniejszy od 30° , 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 $\varphi=0$, 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 cewką prądową watomierza. Takie działanie jest zasadne, ponieważ dopuszczalne przekroczenia zakresu prądowego watomierza wynoszą zwykle tylko 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° względem fazy napięcia.

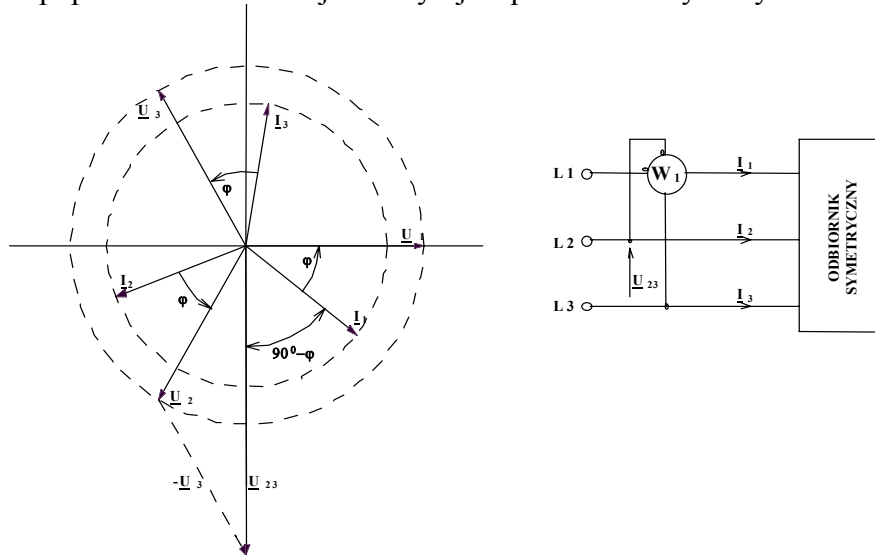
Wykorzystując zależność matematyczną: $\sin \varphi = \cos(90^\circ - \varphi)$

oraz fakt, że w linii trójfazowej występuje naturalne przesunięcie między napięciem fazowym

i jednym z napięć międzyfazowych o 90° 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.

Układ do pomiaru mocy biernej odbiornika symetrycznego watomierzem i wykres wektorowy dla poparcia słuszności tej metody i jest przedstawiony na rys. 26:



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

Moc bierna tego odbiornika wynosi:

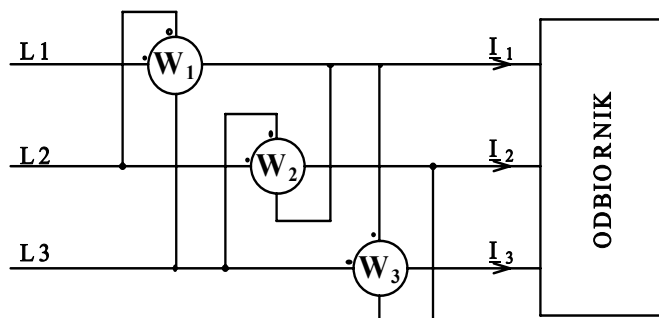
$$Q = \sqrt{3}P_w,$$

gdzie P_w – wskazanie watomierza.

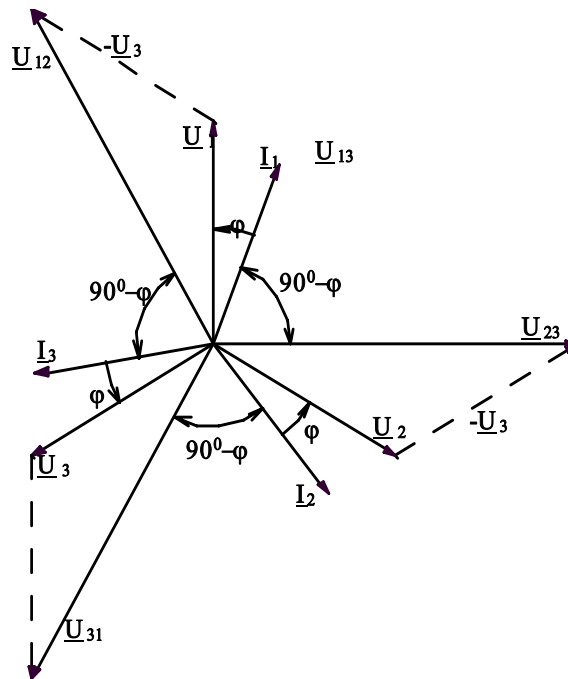
Moc bierną układu trójfazowego symetrycznego (symetryczne źródło i odbiornik) można wyznaczyć także na podstawie wskazań dwóch watomierzy włączonych do pomiaru mocy czynnej w układzie Arona (rys. 24) – można wykazać, że moc bierna jest równa różnicy wskazań obu watomierzy pomnożonej przez $\sqrt{3}$, czyli:

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

Moc bierną odbiornika niesymetrycznego można zmierzyć w układzie pokazanym na rys. 27. Wykres dla tego układu przedstawiono na rys. 28.



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



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

Moc bierna w układzie jak na rys. 27 wynosi:

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

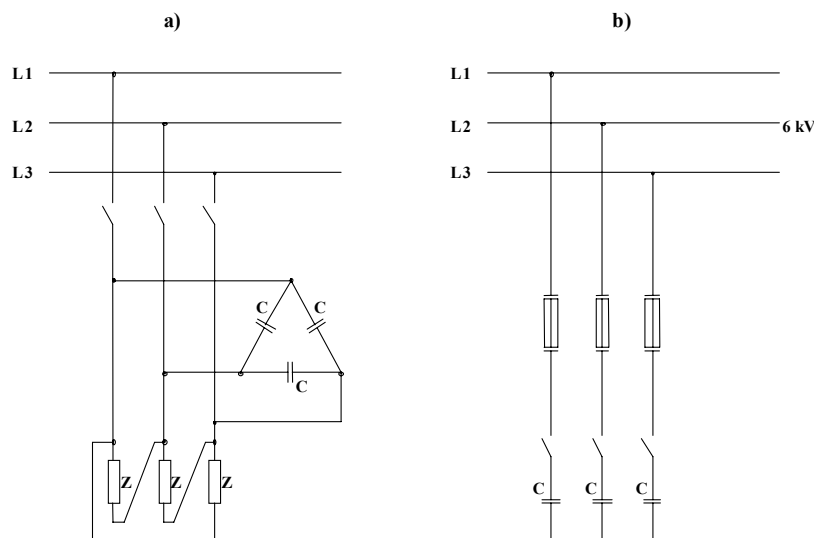
gdzie: Q_1, Q_2, Q_3 – wskazania watomierzy.

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

Poprawa współczynnika mocy w układach trójfazowych

Znaczenie współczynnika mocy ($\cos \varphi$) 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. 29a). 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. 29b).



Rys. 29. 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. Obliczenie pojemności kondensatora, który należy dołączyć do poszczególnych faz odbiornika w celu uzyskaniażądanego współczynnika mocy wykonuje 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 ($\cos \varphi$) przed kompensacją, (jeżeli nie są znane):

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

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{S_1}$$

- 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):

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2}$$

- 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, że tracą one powoli swój ładunek i dotknięcie ich ręką nawet po długim czasie może spowodować porażenie. Dotyczy to kondensatorów przy grupowej kompensacji mocy biernej. Dlatego równoległe 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 ($\cos \varphi$) ?
- 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?
- 11) Jak można mierzyć moc czynną w układach trójfazowych symetrycznych?
- 12) Jak można mierzyć moc czynną w układach trójfazowych niesymetrycznych?
- 13) Jak należy włączyć watomierze przy pomiarze mocy czynnej w układach trójfazowych metodą dwóch watomierzy (metoda Arona)?
- 14) W jakim przypadku przy stosowaniu do pomiaru mocy dwóch watomierzy ich wskazania będą jednakowe?
- 15) Co należy zrobić w przypadku, gdy jeden z watomierzy odchyła się w przeciwną stronę?

- 16) Jak można wyjaśnić przyczynę wychylenia się watomierzy w różnych kierunkach?
- 17) W jaki sposób mierzymy moc bierną odbiorników trójfazowych symetrycznych?
- 18) W jaki sposób mierzymy moc bierną odbiorników trójfazowych niesymetrycznych?

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 $U_p = 400 \text{ V}$. 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,
- 4) napisać zależność na moc czynną i obliczyć tę moc,
- 5) obliczyć reaktancję fazową oraz $\sin \varphi$,
- 6) napisać zależność na moc bierną odbiornika i obliczyć ją,
- 7) napisać zależność na moc pozorną i obliczyć ją.

Wyposażenie stanowiska pracy:

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

Ćwiczenie 2

Oblicz moc czynną, bierną i pozorną odbiornika trójfazowego symetrycznego indukcyjnego połączonego w trójkąt, zasilanego z sieci trójfazowej o napięciu międzyfazowym $U_p = 400 \text{ V}$. 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 współczynnik mocy,
- 3) napisać zależność na moc czynną i obliczyć tę moc,
- 4) obliczyć reaktancję fazową oraz $\sin \varphi$,
- 5) napisać zależność na moc bierną odbiornika i obliczyć ją,
- 6) napisać zależność na moc pozorną i obliczyć ją.

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 $U_p = 400 \text{ V}$, a rezystancja fazowa $R_f = 100 \Omega$.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

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

Dokonaj pomiarów mocy czynnej oraz prądów i napięć koniecznych do określenia mocy biernej, pozornej i $\cos\varphi$ odbiornika trójfazowego impedancyjnego połączanego 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 4),
- 2) przerysować schemat do zeszytu,
- 3) połączyć układ jak na rysunku:
 - oszacować wartości prądów i napięć,
 - dobrać mierniki odpowiedniego rodzaju i o właściwych zakresach,
 - przed przyłączeniem układu do sieci zasilającej sprawdzić w bezpieczny sposób brak napięcia na zaciskach fazowych,
- 4) sporządzić wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego z opisem ich danych eksploatacyjnych,

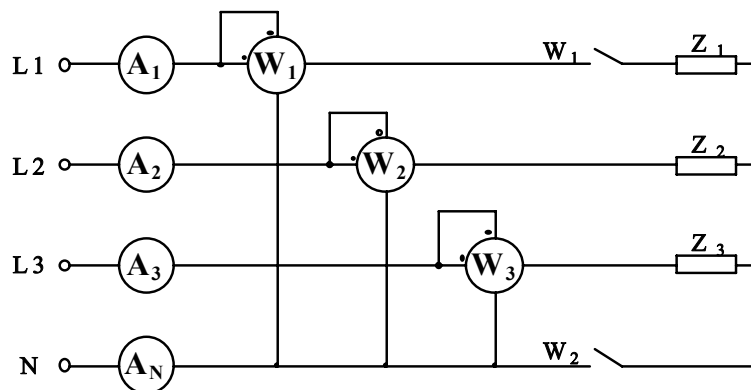
- 5) przygotować tabelę do zapisania wyników pomiarów: $I_1, I_2, I_3, I_N, U_{12}, U_{23}, U_{31}, U_1, U_2, U_3, P_1, P_2, P_3$ oraz obliczeń: $\sum P$ (suma wskazań watomierzy), $S, \cos \varphi, Q$ dla następujących przypadków:
 - odbiornik symetryczny z przewodem neutralnym,
 - odbiornik niesymetryczny z przewodem neutralnym,
 - odbiornik symetryczny z przewodem neutralnym z przerwą jednej fazy,
- 6) zgłosić nauczycielowi gotowość wykonywania pomiarów,
- 7) wykonać pomiary dla wymienionych przypadków, zapisać wyniki w przygotowanej tabeli,
- 8) wykonać obliczenia,
- 9) zanalizować wyniki pomiarów i obliczeń,
- 10) sformułować i zapisać wnioski dotyczące wpływu asymetrii na wartości mocy i pozostałych wielkości.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- schemat połączeń (rysunek do ćwiczenia 4),
- odbiornik trójfazowy symetryczny impedancyjny,
- amperomierze elektrodynamiczne,
- watomierze elektrodynamiczne,
- woltomierz i przełącznik woltomierzowy lub odpowiednia ilość woltomierzy,
- rezystor laboratoryjny,
- wyłączniki jednofazowe, wyłącznik trójfazowy.

Uwagi do wykonania ćwiczenia:

- pomiary napięć można wykonać jednym woltomierzem za pośrednictwem przełącznika woltomierzowego lub za pomocą przewodów zakończonych odpowiednio długimi końcówkami i dotykania nimi do odpowiednich punktów układu, zachowując ostrożność
- 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: $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$.



Rysunek do ćwiczenia 4 [źródło własne]

Ćwiczenie 5

Dokonaj pomiarów mocy czynnej oraz prądów i napięć koniecznych do określenia mocy biernej, pozornej i $\cos\varphi$ 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.

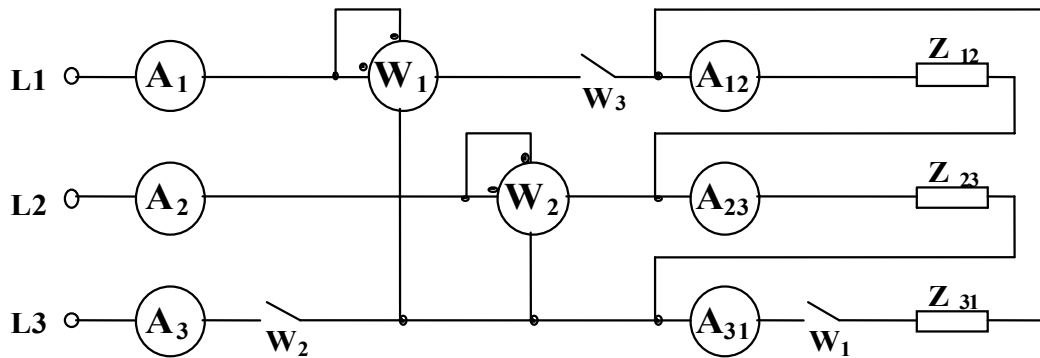
Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zapoznać się z danymi znamionowymi odbiornika i sieci zasilającej oraz schematem połączeń (rysunek do ćwiczenia 5),
- 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), $S, \cos\varphi, Q$ 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 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 5),
- odbiornik trójfazowy symetryczny impedancyjny,
- amperomierze elektrodynamiczne,
- watomierze elektrodynamiczne,
- woltomierz i przełącznik woltomierzowy lub odpowiednia ilość woltomierzy,
- rezystor laboratoryjny,
- wyłączniki jednofazowe, wyłącznik trójfazowy.



Rysunek do ćwiczenia 5 [w oparciu o 3]

Uwagi do wykonania ćwiczenia:

- pomiary napięć można wykonać jednym woltmierzem za pośrednictwem przełącznika woltmierzowego lub za pomocą przewodów zakończonych odpowiednio długimi końcówkami i dotykania nimi do odpowiednich punktów układu, zachowując ostrożność,
- moc pozorną dla układu symetrycznego obliczyć z zależności: $S = \sqrt{3}UI$, gdzie U, I – średnie wartości wskazań woltmierzów 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: $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$,
- w przypadku gdy jeden z watomierzy odchyła się w niewłaściwą stronę, należy zamienić miejscami przyłączenie początku z końcem cewki prądowej lub napięciowej tego watomierza, a jego wskazania do obliczenia mocy przyjmując jako ujemne.

Ćwiczenie 6

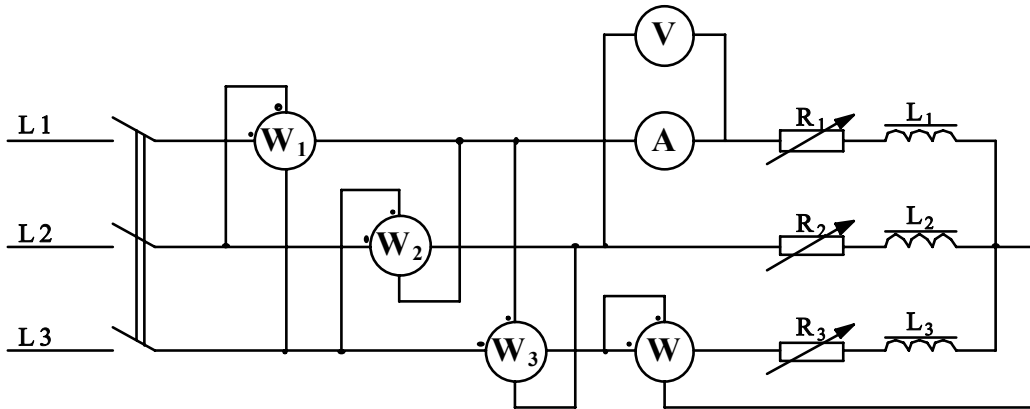
Zmierz moc bierną odbiornika trójfazowego symetrycznego dwoma i trzema watomierzami. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oblicz współczynnik mocy.

Sposób wykonania ćwiczenia

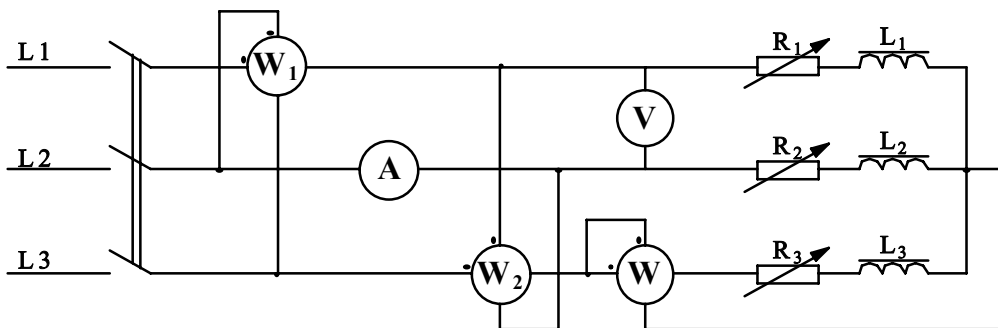
Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 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: $Q, P, S, \cos \varphi$,
- 9) zgłosić nauczycielowi gotowość 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 6),
 - odbiornik trójfazowy symetryczny impedancyjny (jako odbiornik trójfazowy można wykorzystać uzwojenie pierwotne transformatora trójfazowego połączone ewentualnie z rezystorami suwakowymi),
 - amperomierz,
 - watomierze elektrodynamiczne,
 - woltomierz,
 - wyłącznik trójfazowy.



Rysunek 1 do ćwiczenia 6 - pomiar mocy biernej trzema watomierzami [3]



Rysunek 2 do ćwiczenia 6 - pomiar mocy biernej dwoma watomierzami [3]

Uwaga do wykonania ćwiczenia:

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

Ćwiczenie 7

Dobierz pojemność jednej fazy kondensatora trójfazowego połączonego w gwiazde, 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:

	Tak	Nie
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) dobrać watomierze do pomiaru mocy czynnej i biernej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) pomierzyć moc odbiornika trójfazowego symetrycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) pomierzyć moc 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) włączyć watomierze do pomiaru mocy biernej odbiornika i zmierzyć tę moc?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) uzasadnić możliwość pomiaru mocy biernej watomierzami i sposób ich włączenia?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) na podstawie pomiarów wyznaczyć współczynnik mocy odbiornika?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) zanalizować pracę układu trójfazowego na podstawie pomiarów mocy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) ocenić charakter układu na podstawie pomiarów mocy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12) uzasadnić cel poprawy współczynnika mocy i sens fizyczny kompensacji mocy biernej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13) dobrać kondensatory do poprawy współczynnika mocy do założonej wartości i włączyć je właściwie do układu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.4. Pomiar energii elektrycznej w układach trójfazowych

4.4.1. Materiał nauczania

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

$$W = Pt$$

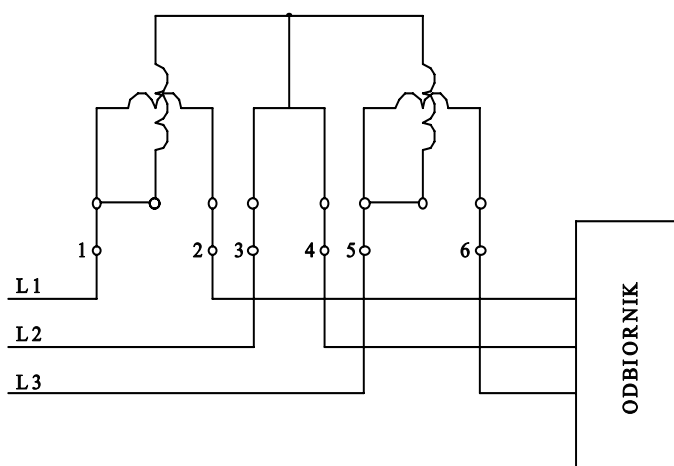
Zwyczajowo przyjęte jest określanie energii elektrycznej czynnej po prostu energią elektryczną.

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 stosuje się najczęściej liczniki indukcyjne trójfazowe. Zasada działania licznika mierzącego moc w układzie trójfazowym jest taka sama jak licznika jednofazowego, różni się natomiast budową.

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

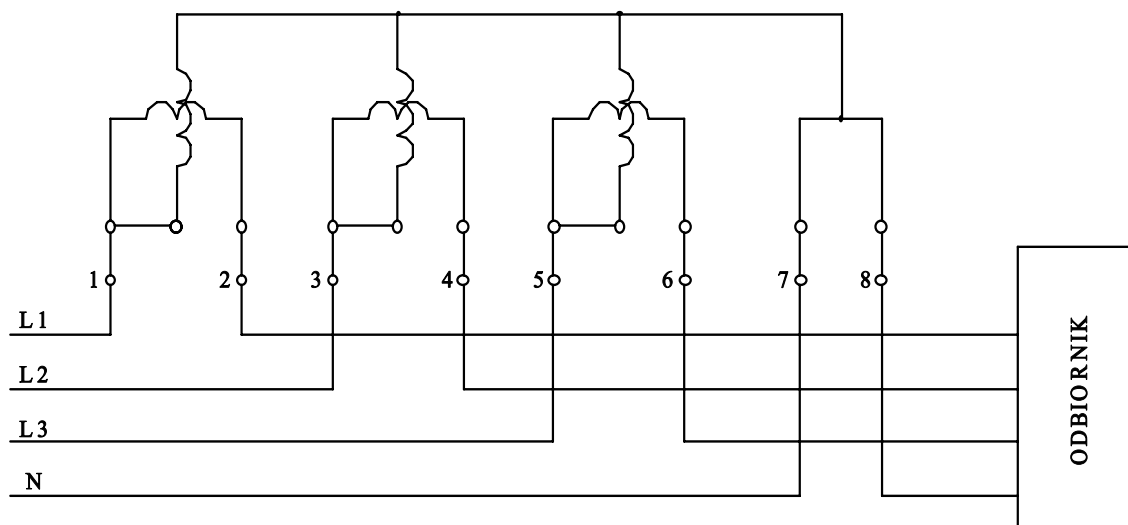
Liczniki przyłączane do sieci trójprzewodowej mają dwa ustroje pomiarowe działające na wspólną oś. W analogii do pomiaru mocy w układzie trójfazowym trójprzewodowym taki układ nazywamy układem Arona. Na rys 30 przedstawiony jest układ połączeń takiego licznika.



Rys. 30. Układ połączeń trójfazowego trójprzewodowego licznika energii czynnej o dwóch ustrojach pomiarowych [w oparciu o 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 jest na rys. 31.



Rys. 31. Układ połączeń licznika trójfazowego czteroprzewodowego o trzech urządzeniach pomiarowych. [w oparciu o 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 ilość obrotów tarczy licznika przy poborze energii równej 1 kWh. Na jej podstawie można określić pośredni 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 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 $\sqrt{3}$. [2]

4.4.2. 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 trójustrojowe?
- 3) W jaki sposób należy włączać cewki licznika trójustrojowy do pomiaru energii czynnej?
- 4) W jakich układach należy stosować liczniki dwuustrojowe?
- 5) W jaki sposób należy włączać cewki licznika dwuustrojowego do pomiaru energii czynnej?

4.4.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Dokonaj pomiaru energii pobranej przez odbiornik trójfazowy w ciągu 5 minut licznikiem trójfazowym. 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) wykonać obliczenie mocy,
- 11) uzasadnić wybór licznika.

Wyposażenie stanowiska pracy:

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

Ćwiczenie 2

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

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) sprawdzić istnienie napięcia zasilającego (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 zwarty),
- miernik uniwersalny AC/DC z funkcją pomiaru napięcia i rezystancji.

4.3.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
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?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. SPRAWDZIAN OSIĄGNIĘĆ

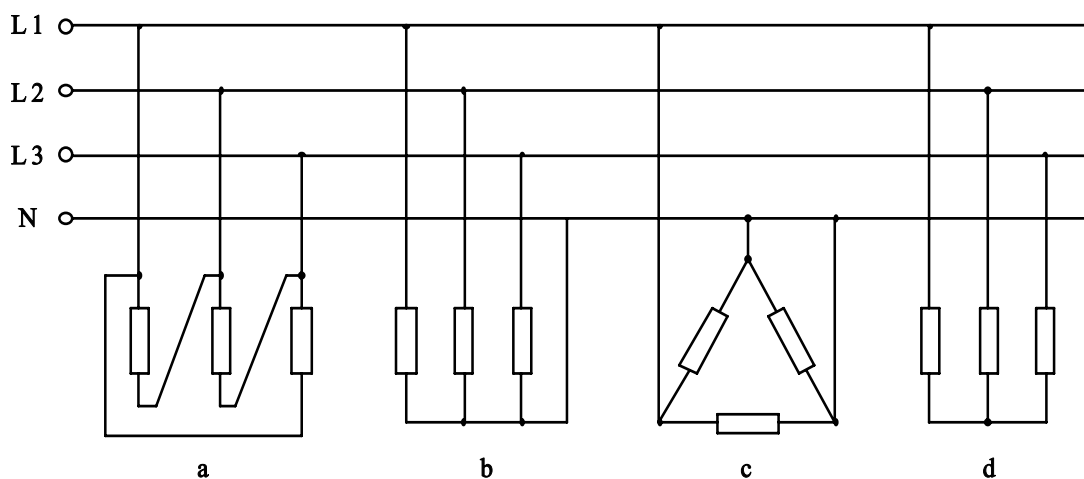
INSTRUKCJA DLA UCZNIĄ

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 16 pytań. Do każdego pytania 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 weź błędną odpowiedź w kółko, 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 24 minuty.
12. Po zakończeniu testu podnieś rękę i zaczekaj, aż nauczyciel odbierze od Ciebie pracę.

Powodzenia!

Zestaw zadań testowych

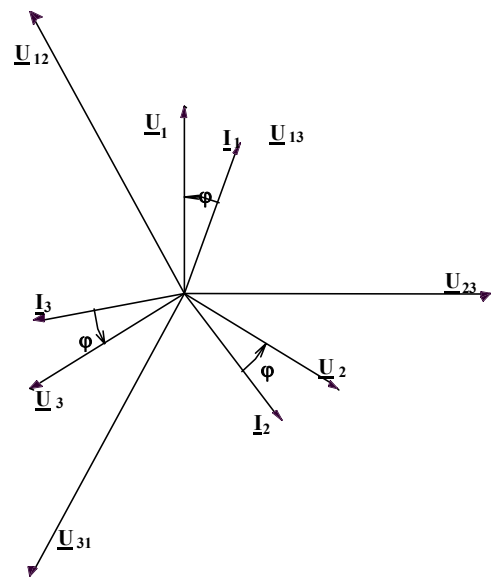
- 1) W uzwojeniach fazowych prądnicy trójfazowej indukują się siły elektromotoryczne o jednakowej amplitudzie, ponieważ:
- prądnica posiada jedną magnesnicę,
 - uzwojenia wszystkich faz są identyczne,
 - uzwojenia wszystkich faz są przesunięte co 120° ,
 - prądnica posiada jedną parę biegunów.
- 2) Który z odbiorników połączono w trójkąt i przyłączono do sieci trójfazowej?



- 3) Dla odbiornika trójfazowego symetrycznego skojarzonego w gwiazdę słuszne są zależności:
- $U_f = U_p$ oraz $I_f = I_p$,
 - $U_f = \sqrt{3}U_p$ oraz $I_f = I_p$,
 - $U_p = \frac{U_f}{\sqrt{3}}$ oraz $I_p = \frac{I_f}{\sqrt{3}}$,
 - $U_f = \frac{U_p}{\sqrt{3}}$ oraz $I_f = I_p$.
- 4) Dla odbiornika trójfazowego symetrycznego skojarzonego w trójkąt słuszne są zależności:
- $U_f = U_p$ oraz $I_f = I_p$,
 - $U_f = \sqrt{3}U_p$ oraz $I_f = I_p$,
 - $U_p = U_f$ oraz $I_p = \sqrt{3}I_f$,
 - $U_f = \frac{U_p}{\sqrt{3}}$ oraz $I_f = I_p$.

5) Rysunek przedstawia wykres wektorowy dla odbiornika trójfazowego symetrycznego:

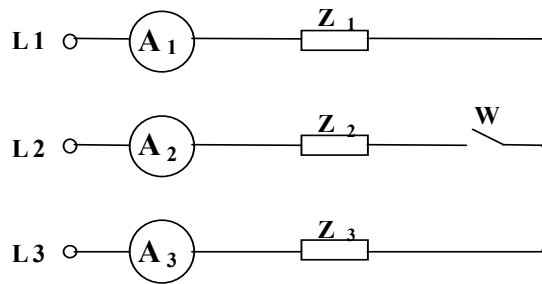
- indukcyjnego połączonego w gwiazdę,
- pojemnościowego połączonego w gwiazdę,
- indukcyjnego połączonego w trójkąt,
- pojemnościowego połączonego w trójkąt.



- 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 $U = 400V$ należy użyć amperomierza o zakresie:
 - 25 A,
 - 15 A,
 - 5A,
 - 1 A.
- Do poprawnego pomiaru prądu przewodowego pobieranego przez silnik indukcyjny trójfazowy połączony w trójkąt o impedancji jednej fazy $Z = 50 \Omega$, zasilany z sieci o napięciu międzyfazowym $U = 400V$ należy użyć amperomierza o zakresie:
 - 25 A,
 - 15 A,
 - 5 A,
 - 1 A.
- Po dołączeniu zasilania z sieci trójfazowej do silnika indukcyjnego trójfazowego wirnik wiruje w kierunku przeciwnym do oczekiwanego. Jest to spowodowane:
 - przerwą w przewodzie zasilającym,
 - zwarcie dwóch faz,
 - zamianą kolejności faz napięć zasilających,
 - przerwą w uzwojeniu jednej fazy silnika.

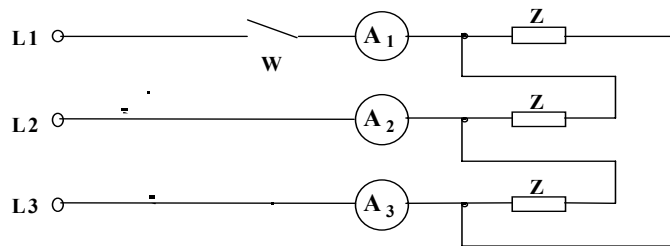
Przy zamkniętym wyłączniku W amperomierze wskazują prądy: $I_1 = I_2 = I_3$. Po otwarciu wyłącznika:

- 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.



9) 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.



10) Symetryczny odbiornik trójfazowy rezystancyjny połączony w gwiazdę przyłączono do sieci trójfazowej o napięciu $U=400V$. W każdej fazie płynie prąd równy 5A. Jaka jest moc czynna tego odbiornika?

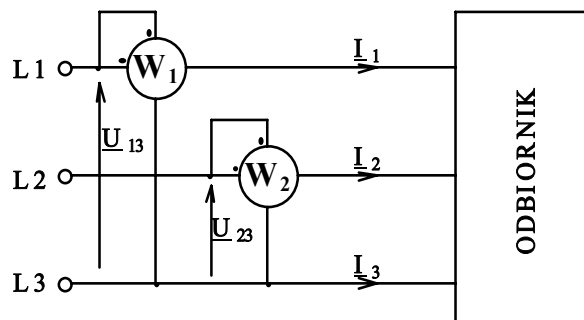
- a) $P = 1,15 \text{ kW}$
- b) $P = 3,45 \text{ kW}$
- c) $P = 6 \text{ kW}$
- d) $P = 18 \text{ kW}$.

11) Moc czynną odbiornika trójfazowego niesymetrycznego obliczamy z zależności:

- a) $P = \sqrt{3}U_f I_f \cos \varphi$,
- b) $P = 3UI \cos \varphi$,
- c) $P = U_{f1} I_{f1} \cos \varphi_1 + U_{f2} I_{f2} \cos \varphi_2 + U_{f3} I_{f3} \cos \varphi_3$,
- d) $P = U_{p1} I_{p1} \cos \varphi_1 + U_{p2} I_{p2} \cos \varphi_2 + U_{p3} I_{p3} \cos \varphi_3$.

12) 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):

- a) $P = P_1 + P_2$,
- b) $P = (P_1 + P_2) \cos \varphi$,
- c) $P = \sqrt{3}(P_1 + P_2)$,
- d) $P = 3(P_1 + P_2)$.



Moc bierną odbiornika z zadania 13 można określić na podstawie wskazań tak włączonych watomierzy z zależności: $Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$, gdy odbiornik trójfazowy jest:

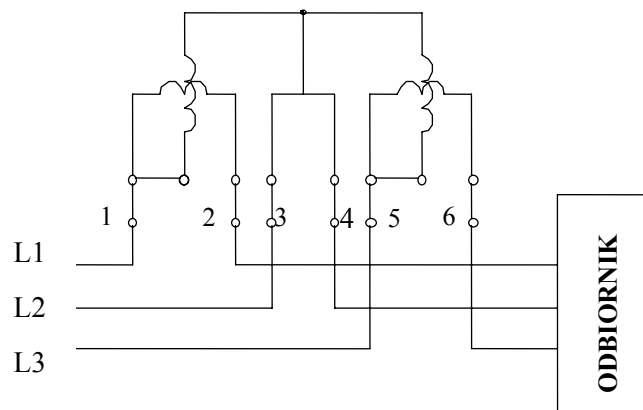
- a) niesymetryczny skojarzony w gwiazdę,
- b) symetryczny skojarzony wyłącznie w gwiazdę,
- c) niesymetryczny skojarzony w trójkąt,
- d) symetryczny skojarzony w gwiazdę lub w trójkąt.

13) Układy trójfazowe **nie mają** zastosowania w:

- a) domowych urządzeniach małej mocy,
- b) silnikach dużej mocy,
- c) transformatorach energetycznych,
- d) prądnicach w elektrowniach.

14) Rysunek przedstawia:

- a) sposób włączenia licznika mierzącego energię pobieraną przez dwie fazy odbiornika trójfazowego,
- b) sposób włączenia licznika mierzącego energię czynną pobieraną przez jedną fazę odbiornika trójfazowego w systemie dwutaryfowym,
- c) sposób włączenia licznika mierzącego energię bierną odbiornika,
- d) sposób włączenia licznika dwuustrojowego do pomiaru energii czynnej odbiornika trójfazowego.



KARTA ODPOWIEDZI

Imię i nazwisko

Obliczanie i badanie obwodów prądu trójfazowego

Zaznacz poprawną odpowiedź

Numer zadania	Odpowiedź				Punkty
	a	b	c	d	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
Razem					

6. LITERATURA

1. Bolkowski S.: Elektrotechnika. WSiP, Warszawa 2004
2. Kurdziel R.: Podstawy elektrotechniki dla szkoły zasadniczej. WSiP, Warszawa 1997
3. Woźniak J.: Pracownia elektryczna t.1. Pomiary elektryczne. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1997