

Temat: Wytwarzanie napięć przemiennych trójfazowych. Podstawowe wielkości w układach trójfazowych

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

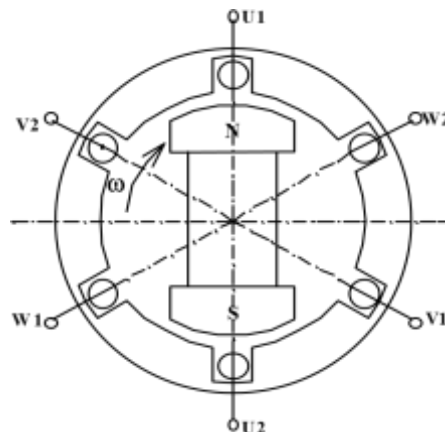
Układ wielofazowy jest układem symetrycznym, jeżeli wszystkie napięcia tego układu mają jednakowe wartości skuteczne (lub amplitudy) i są względem siebie przesunięte w fazie o taki sam kąt.

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 magneśnicy i wirujący ze stałą prędkością kątową ω . 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°). 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

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

Podczas ruchu magneśnicy 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:

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

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

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

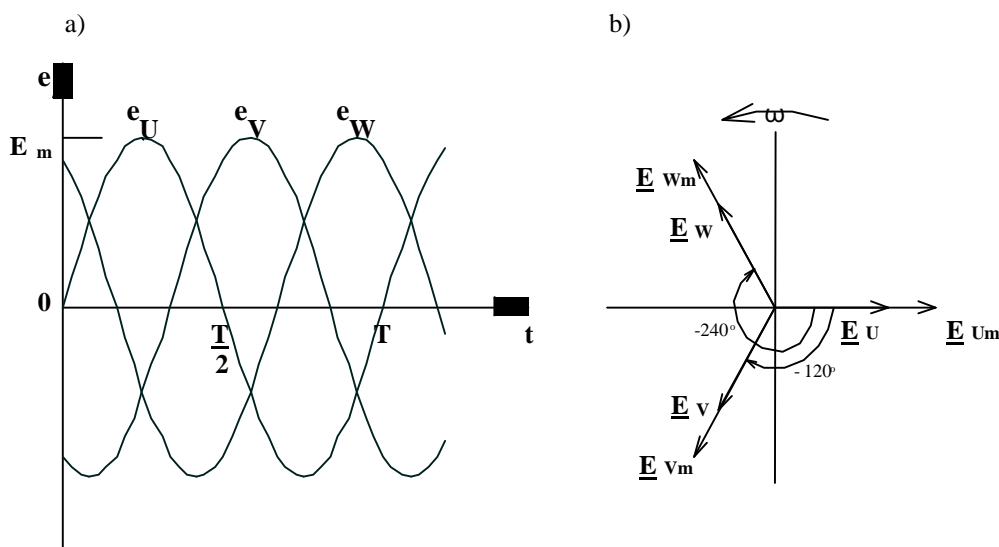
E_m – amplitudy sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach każdej fazy.

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 prądniccy trójfazowej symetrycznej: a) przebiegi w czasie; b) wykres wektorowy dla wartości skutecznych i amplitud

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

Układ połączeń w gwiazdę

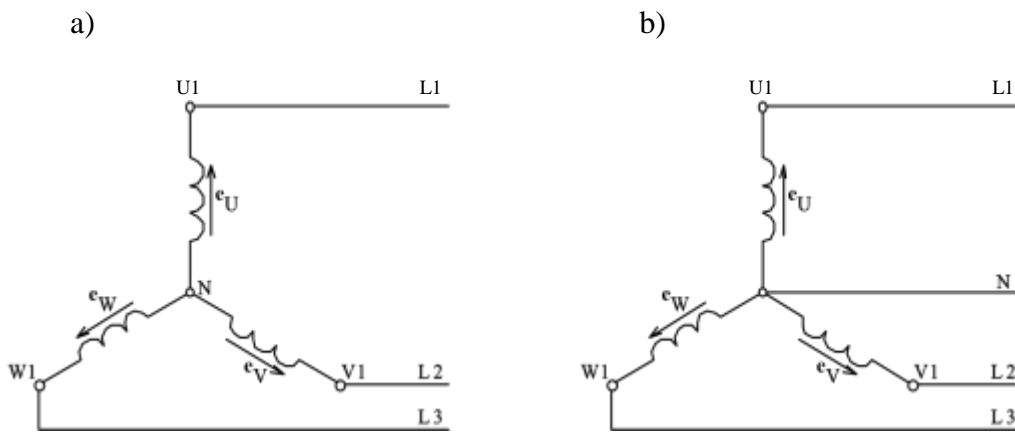
Układ połączeń w gwiazdę może być trójprzewodowy (stosowany w prądnicach wysokiego napięcia) lub czteroprzewodowy (rys. 3).

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

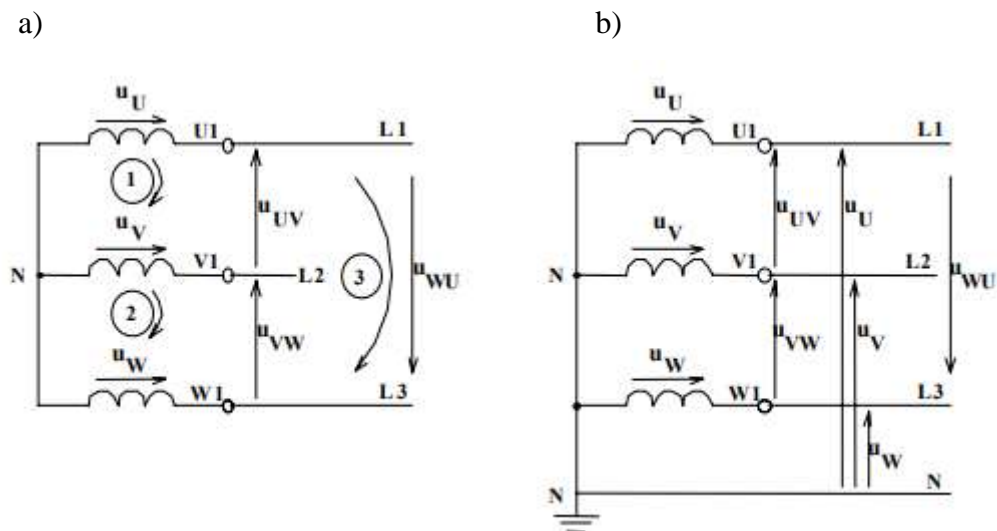
U_U, U_V, U_W – wartości skuteczne.



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

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

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

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

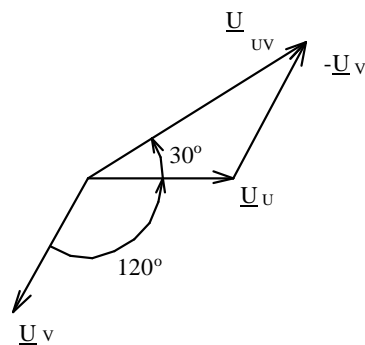
$$\text{Oczko 2: } u_V - u_{VW} - u_W = 0 \quad \text{stąd: } u_{VW} = u_V - u_W$$

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

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 ω odpowiada odejmowanie opisujących je wektorów.

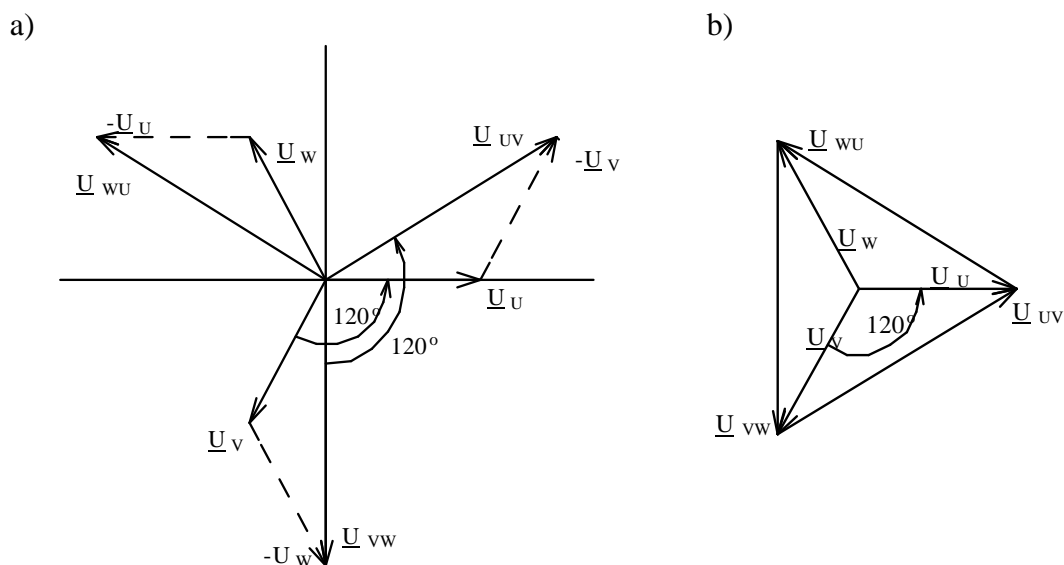
Na rys. 5 pokazany jest sposób wyznaczania napięcia międzyfazowego.



Rys. 5. Wyznaczanie napięcia międzyfazowego w układzie gwiazdowym.

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, powszechny sposób rysowania wektorów napięć fazowych i międzyfazowych

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 .

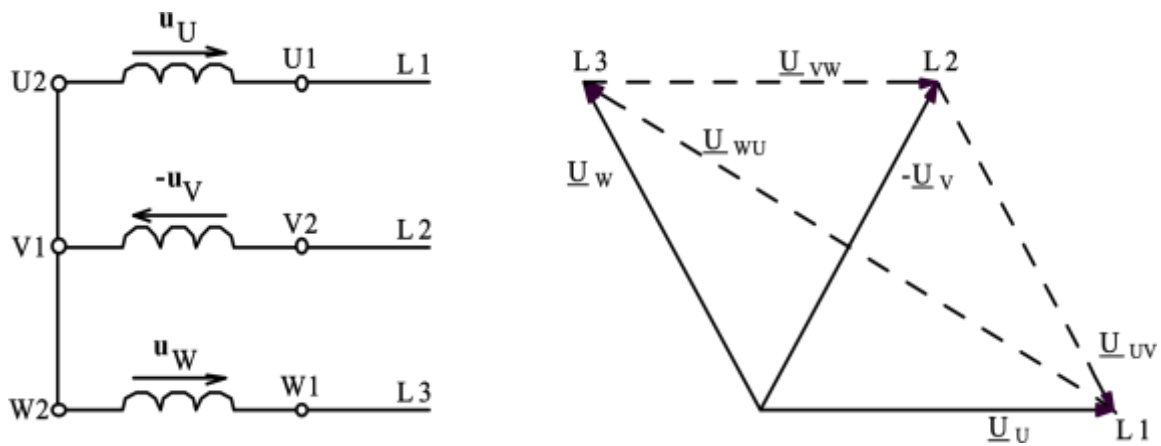
Przesuwając równolegle wektory napięć międzyfazowych (bez zmiany ich kierunku, zwrotu i długości) otrzymujemy trójkąt napięć międzyfazowych, którego wierzchołki wyznaczone są przez wektory napięć fazowych (rys. 6.b).

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.



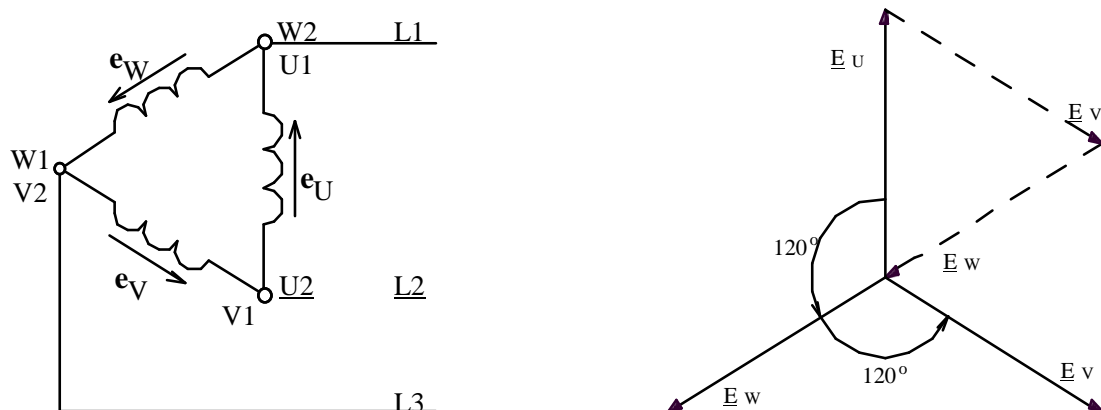
Rys. 7. Nieprawidłowe połączenie uzwojeń prądnicy w gwiazdę: a) zamienione zaciski fazy V (L2); b) wykres wektorowy

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

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:

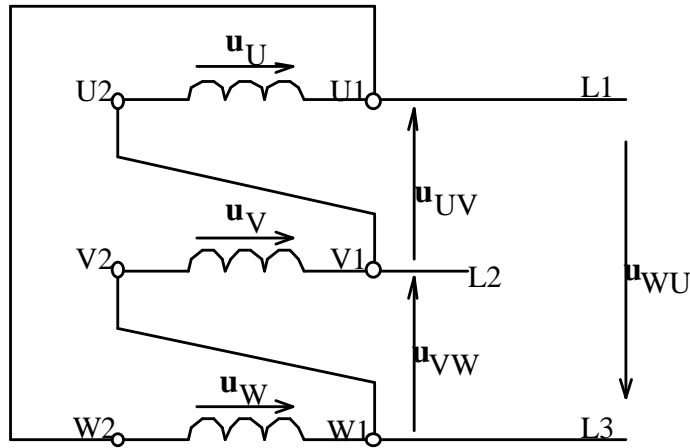
$$\underline{E}_U + \underline{E}_V + \underline{E}_W = 0$$

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:

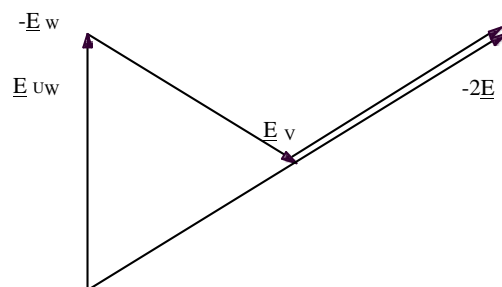
$$U_p = U_f$$



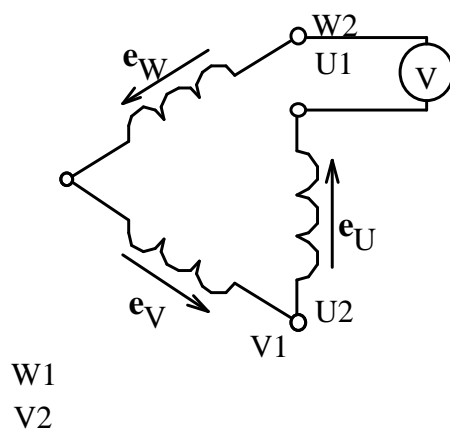
Rys. 9. Powszechnie stosowany sposób oznaczania napięć w układzie trójkątowym

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))



Rys. 11. Pomiar napięcia na zaciskach otwartego trójkąta

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

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.