

**Zespoł Szkół
Technicznych
im. J. i J. Śniadeckich
w Grudziądzu**



Laboratorium Elektryczne . Pracownia
Automatyki i Robotyki (s.48)

**Instrukcja Laboratoryjna:
17. Badanie układów 3-fazowych**

Opracował mgr inż. Marcin Jabłoński

Celem wiczenia jest zapoznanie si z podstawowymi waciwo ciami symetrycznych i niesymetrycznych ukadów trójfazowych gwiazdowych i trójk towych.

43.1. Wiadomo ci ogólne

43.1.1 Okre lenie ukadów trójfazowych

43.1.2 Ustalenie kolejno ci faz sieci zasilaj cej

43.1.3 PoŁczenia ukadów trójfazowych

43.1.3.1 PoŁczenie gwiazdowe

43.1.3.2 PoŁczenie trójk towe

43.1.4 Zale no ci pomi dzy napi ciami i pr dami w ukadach trójfazowych

43.1.5 Ukady trójfazowe niesymetryczne

43.1.5.1 Obliczanie ukadów trójfazowych

43.1.5.2 Przerwa w jednym z przewodów zasilaj cych

43.1.5.3 Zwarcie w jednej z faz odbiornika poŁczonego w gwiazd , zasilanego z linii 3-przewodowej

43.2. Badania laboratoryjne

43.2.1 Wyznaczenie kolejno ci faz sieci zasilaj cej

43.2.2 Badanie odbiornika poŁczonego w gwiazd

43.2.3 Badanie odbiornika poŁczonego w trójk t

43.3. Uwagi i wnioski

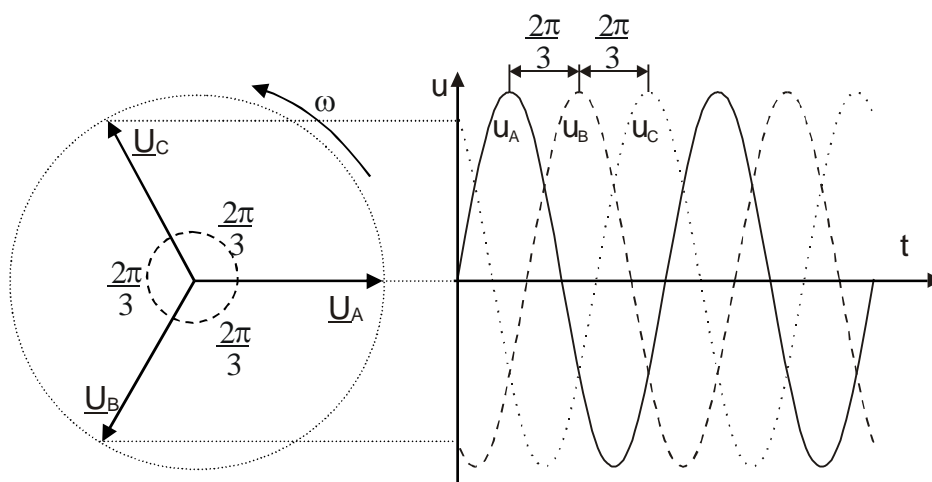
43.1.Wiadomo ci ogólne

43.1.1. Okre lenie ukadów trójfazowych

Ukadem napi (pr dów, mocy) trójfazowych nazywamy skojarzenie trzech napi (pr dów, mocy) o tej samej cz stotliwo ci i przesuni tych w fazie o ten sam k t.

Jeśli amplitudy tych napięć (prądów, mocy) są równe, a przesunięcia fazowe wynoszą kolejno $2\pi/3$ (120°), to taki układ trójfazowy nazywamy **symetrycznym**.

Napięcie trójfazowe jest wytwarzane w generatorze (prądniczy), posiadającym trzy jednakowe uzwojenia, zwane **uzwojeniami fazowymi** przesunięte względem siebie geometrycznie o kąt 120° , wirujące ze stałą prędkością w polu magnetycznym. Fazy oznaczane są tradycyjnie literami: A, B, C; R, S, T bądź U, V, W. Według najnowszych Polskich Norm powinny być stosowane oznaczenia faz L_1, L_2, L_3 .



Rys. 43.2. Wykres wskazowy i przebiegi napięć układu 3-fazowego

Każde uzwojenie generatora można przedstawić w postaci idealnego źródła napięcia sinusoidalnego, wobec czego schemat zastępczy generatora przedstawia trzy źródła napięcia o napięciach źródłowych u_A, u_B, u_C . Jeśli założymy, że napięcie fazy B opóźnia się względem fazy A o 120° , a napięcie fazy C względem fazy B również o 120° , czyli opóźnia się względem fazy A o 240° , to wartości chwilowe napięć generatora wyniosą odpowiednio:

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \\ u_B &= U_m \sin(\omega t + \varphi_u - 120^\circ) \\ u_C &= U_m \sin(\omega t + \varphi_u - 240^\circ) \end{aligned} \quad (43.1)$$

(przy założeniu, że amplitudy napięć U_m oraz pulsacje ω , oraz fazy napięć φ_u są takie same we wszystkich uzwojeniach fazowych).

Wartości zespolone¹ powyższych napięć wynoszą wówczas :

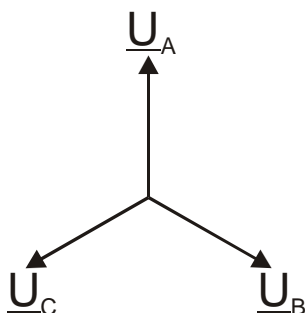
$$\underline{U}_A = U e^{j\varphi_u}$$

$$\underline{U}_B = U e^{j(\varphi_u - 120^\circ)}$$

(43.2)

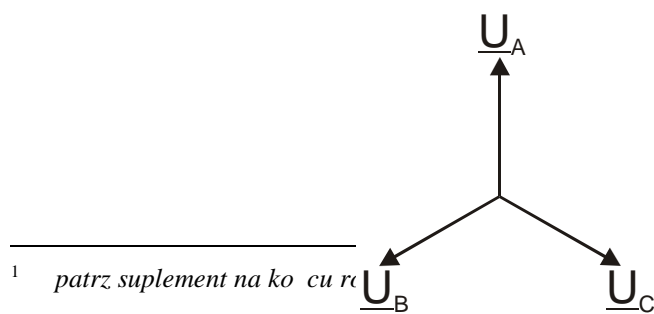
$$\underline{U}_C = U e^{j(\varphi_u - 240^\circ)}$$

gdzie $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ - wartość skuteczna tych napięć. Taki trójfazowy układ napięć o kolejno następujących fazach: A, B, C nazywamy układem o kolejno ci zgodnej.



Rys. 43.3. Wykres wskazowy układu o kolejno ci zgodnej napięć 3-fazowych

Jeżeli natomiast napięcie fazy B wyprzedza napięcie fazy A o 120° , natomiast napięcie fazy C wyprzedza napięcie fazy B o 120° , czyli wyprzedza napięcie fazy A o 240° , to taki układ nazywamy układem o kolejno ci przeciwnej.



¹ patrz suplement na końcu rozdziału

Rys. 43.4. Wykres wskazowy układu o kolejno ci przeciwnej napięć 3-fazowych

Generator trójfazowy nazywamy **symetrycznym**, gdy napięcia na zaciskach uzwojeń mają takie same wartości skuteczne, a przesunięcie między napięciami dwóch kolejnych faz wynosi 120° . Napięcia generatora symetrycznego tworzą układ zgodny lub przeciwny.

Szerokie zastosowanie układów trójfazowych w elektroenergetyce wynika z ich zalet, takich jak:

- obniżenie zużycia materiału na przewody przy dostarczeniu określonej mocy do odbiornika,
- uzyskanie podwyższonej o $\sqrt{3}$ wartości napięcia (napięcia międzyfazowe), w wyniku czego odbiornik może pracować przy niższej wartości prądu,
- mniejsze straty mocy w przewodach przy danym napięciu i mocy przesyłanej (w wyniku zmniejszenia wartości prądu),
- wytworzenia wirującego pola magnetycznego wykorzystanego w silnikach trójfazowych,

w porównaniu z równoważnymi układami jednofazowymi. Dzięki powyższym zaletom koszty przesyłu energii w układach trójfazowych są znacznie niższe niż w przypadku układów jednofazowych.

43.1.2 Ustalanie kolejności faz trójfazowej sieci zasilającej

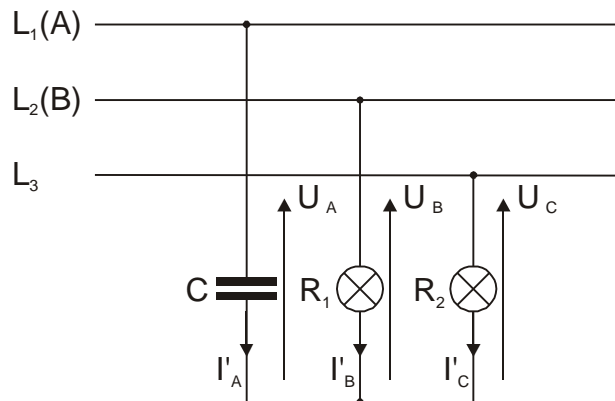
Ustalenie kolejności faz sieci zasilającej odbiornik trójfazowy odgrywa istotną rolę tylko w przypadku szczególnym, gdy praca odbiornika jest zależna od tej kolejności. Typowym przykładem takich odbiorników są urządzenia, w których występuje pole magnetyczne wirujące - silniki asynchroniczne. Zmiana kolejności faz powoduje zmianę kierunku wirowania silnika na przeciwny, co może spowodować uszkodzenie maszyny.

Do wyznaczenia kolejności faz służą przyrządy, zwane wskaźnikami kolejności faz. Istnieją 3 zasadnicze typy tych urządzeń: elektromechaniczny, elektroniczny oraz zastępczy-elektryczny.

Głównym elementem wskaźnika elektromechanicznego jest miniaturowy trójfazowy silniczek asynchroniczny, sprzęgnięty mechanicznie z obrotową tarczą. Po przyłączeniu badanej sieci do odpowiednich zacisków wskaźnika, silniczek zaczyna wirować, napędzając tarczę. Prawy (tj. zgodny z ruchem wskazówek zegara) kierunek obrotów tarczy informuje o kolejności zgodnej (według oznaczenia zacisków) faz, natomiast lewy - o kolejności przeciwnej.

Wskaźnik elektroniczny, zbudowany na elementach półprzewodnikowych, charakteryzuje się małymi wymiarami i małym obciążeniem (w porównaniu do elektromechanicznego). Posiada on zwykle 5 diod świecących, informujących o stanie badanej sieci. Świecenie diody zielonej świadczy o kolejno zgodnej, diody czerwonej - o kolejno przeciwnej. Świecenie 3 diod błękitnych wskazuje na obecność napięć fazowych.

W przypadku braku powyższych wskaźników można na samym miejscu zbudować prosty zastępczy wskaźnik elektryczny, zawierający dwie żarówki i kondensator (lub cewkę indukcyjną), jak na rysunku 43.5.



Rys. 43.5. Układ pomiarowy do ustalenia kolejności faz sieci zasilającej

W celu prawidłowego funkcjonowania układu powinien być spełniony warunek:

$$R_1 = R_2 = 1/\omega C$$

lub: $R_1 = R_2 = \omega L$ (43.3)

gdzie: R_1, R_2 - rezystancje żarówek (w stanie świecenia), C - pojemność kondensatora, L - indukcyjność cewki, ω - pulsacja sieci zasilającej (314 rad/s).

Kondensator przyłącza się do jednego z przewodów sieci, traktowanego umownie, jako pierwszy (A). Po załączeniu układu, wskutek pojemnościowego charakteru fazy zawierającej kondensator, wystąpi niesymetryczny układ napięć fazowych. Wartość skuteczna napięcia fazy drugiej będzie większa, niż napięcie fazy trzeciej, co zasygnalizują żarówki. Tak więc żarówka świecąca jaśniejszą jest załączona do fazy drugiej (B), zaś żarówka świecąca ciemniej - do fazy trzeciej (C).

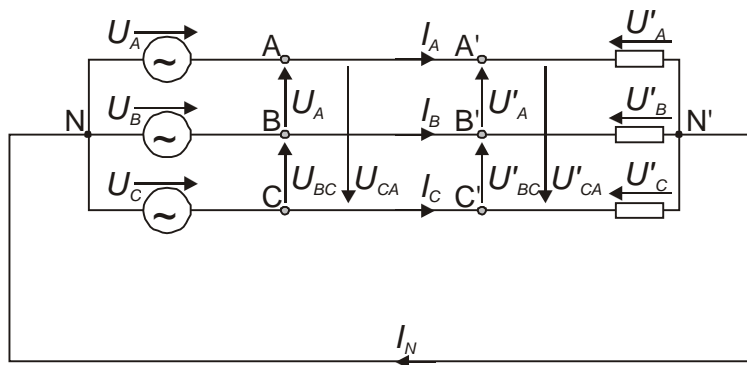
Jeśli zamiast kondensatora zastosujemy cewkę indukcyjną, podłączoną do fazy pierwszej (A), toarówka wiecaja niej oznacza faz trzecią (C), za wieca ciemniej - faz drugą (B).

Zamiastarówek można użyć rezystorów, szczególnie tych podanych w jej zależności i mierzy występującej na nich napięcia.

43.1.3 Połączenia układów trójfazowych

W praktyce najczęściej występują symetryczne układy trójfazowe, zasilane przez symetryczne źródła napięcia. Układy te są połączone (skojarzone) na dwa zasadnicze sposoby: w gwiazdę \star , oraz w trójkąt Δ .

43.1.3.1 Połączenie gwiazdowe \star



Rys. 43.6. Czteroprzewodowy trójfazowy układ gwiazdowy

Uzwojenia generatora (odbiornika) trójfazowego połączone są w gwiazdę, gdy początki wszystkich uzwojeń (zaciski wyjściowe) połączone są ze sobą, zaś końce (zaciski wejściowe) wyprowadzone są na zewnątrz. Punkt wspólny uzwojeń generatora nazywamy **punktem neutralnym generatora**, zaś punkt wspólny zacisków odbiornika **punktem neutralnym odbiornika**. Przewód łączący punkty neutralne generatora i odbiornika nazywamy **przewodem neutralnym** (dawniej nazywanym - przewodem zerowym).

Połączenie gwiazdowe przedstawia rys. 43.6.

Napięcia u'_A, u'_B, u'_C na fazach odbiornika, lub napięcia u_A, u_B, u_C na fazach generatora nazywamy **fazowymi**. Natomiast napięcia u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} między

zaciskami generatora, lub napięcia u'_{AB} , u'_{BC} , u'_{CA} między zaciskami odbiornika nazywamy **międzyprzewodowymi** (w skrócie **przewodowymi**).

Prąd w fazach generatora lub odbiornika nazywamy **fazowymi**, a prąd w przewodach łączących odpowiednio zaciski A, B, C generatora z zaciskami A', B', C' odbiornika nazywamy **przewodowymi**.

Na podstawie rysunku 43.6 możemy zapisać odpowiednio dla napięć chwilowych i dla wartości zespolonych

$$\begin{aligned} u_{AB} &= u_A - u_B & u_{BC} &= u_B - u_C & u_{CA} &= u_C - u_A \\ \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B & \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C & \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A \end{aligned} \quad (43.4)$$

oraz podobnie :

$$\begin{aligned} u_{\emptyset AB} &= u_{\emptyset A} - u_{\emptyset B} & u_{\emptyset BC} &= u_{\emptyset B} - u_{\emptyset C} & u_{\emptyset CA} &= u_{\emptyset C} - u_{\emptyset A} \\ \underline{U}_{\emptyset AB} &= \underline{U}_{\emptyset A} - \underline{U}_{\emptyset B} & \underline{U}_{\emptyset BC} &= \underline{U}_{\emptyset B} - \underline{U}_{\emptyset C} & \underline{U}_{\emptyset CA} &= \underline{U}_{\emptyset C} - \underline{U}_{\emptyset A} \end{aligned} \quad (43.5)$$

Możemy sprawdzić, że suma wartości zespolonych napięć międzyprzewodowych zawsze jest równa zero:

$$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0. \quad (43.6)$$

Natomiast wartość zespolona prądu w przewodzie neutralnym wynosi:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (43.7)$$

Jeżeli w układzie z rys.43.6 nie ma przewodu neutralnego, to taki układ nazywamy **trójprzewodowym**. W układzie trójprzewodowym suma wartości zespolonych prądów fazowych jest równa zero, czyli:

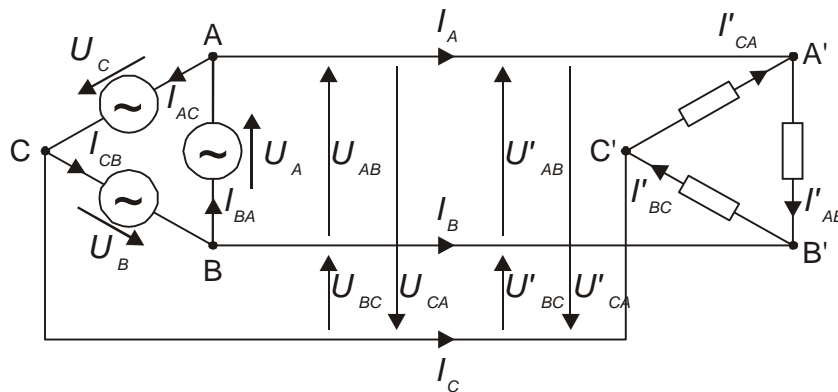
$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (43.8)$$

Symbolem graficznym połączenia gwiazdowego jest \star albo litera **Y**.

43.1.3.2 Połączenie trójkątowe Δ

Uzwojenia generatora (zaciski odbiornika) połączone są w trójkąt, gdy koniec jednego uzwojenia (zacisk wyjściowy jednej fazy odbiornika) jest połączony z początkiem następnego uzwojenia (zaciskiem wejściowym następnego uzwojenia odbiornika), przy czym zaciskami wyjściowymi generatora (wejściowymi

odbiornika) s punkty wspólne par uzwoje (faz odbiornika). Połączenie trójk towe generatora i odbiornika przedstawia rys. 43.7.



Rys. 43.7. Układ trójfazowy z generatorem i odbiornikiem połączonymi w trójkąt

W układzie tym wartości prądów przewodowych, zależnośc od prądów fazowych generatora, lub odbiornika, wynoszą :

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{BA} \dot{+} \underline{I}_{AC} \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{CB} \dot{+} \underline{I}_{BA} \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{AC} \dot{+} \underline{I}_{CB} \end{aligned} \quad (43.9)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}'_A &= \underline{I}'_{AB} \dot{+} \underline{I}'_{CA} \\ \underline{I}'_B &= \underline{I}'_{BC} \dot{+} \underline{I}'_{AB} \\ \underline{I}'_C &= \underline{I}'_{CA} \dot{+} \underline{I}'_{BC} \end{aligned} \quad (43.10)$$

Suma wartości zespolonych prądów przewodowych jest zawsze równa zero:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (43.11)$$

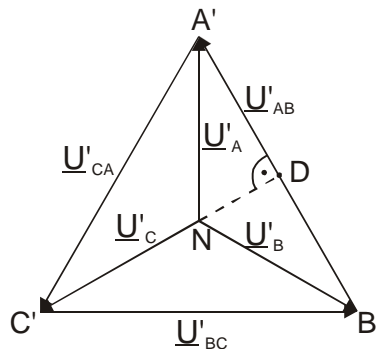
Symbolem graficznym połączenia trójkątowego jest Δ , albo litera **D**.

Prądy i napięcia w układzie poza generatorem nie ulegają zmianie, gdy generator połączony w trójkąt zastąpimy generatorem połączonym w gwiazdę, pod warunkiem, że napięcia międzyprzewodowe pozostaną te same.

Dlatego też, w celu uproszczenia obliczeń, zakładamy, że generatory zasilające układy trójfazowe są połączone w gwiazdę.

43.1.4. Zależności pomiędzy napięciami i prądami w układach trójfazowych

Rozpatrzmy układ połączony w gwiazdę, jak na rys.43.6. Zakładając zgodnie kolejno napięcia oraz symetrię obciążenia, wykreślimy wskazowy takiemu układowi jest następujący:



Rys. 43.8. Wykres wskazowy symetrycznego odbiornika połączony w gwiazdę

Z trójkąta prostokątnego A'ND znajdujemy, że:

$$DA' = NA' \cos 30^\circ . \quad (43.12)$$

Ponieważ :

$$|U'_{AB}| = U'_{AB} = 2 DA', \quad \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (43.13)$$

otrzymujemy:

$$U'_{AB} = \sqrt{3} U'_A . \quad (43.14)$$

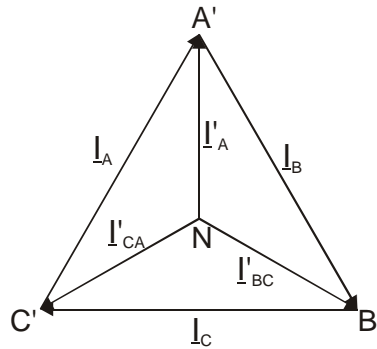
Ponieważ w układzie symetrycznym wartości skuteczne napięć fazowych są jednakowe, oraz wartości skuteczne napięć przewodowych są również jednakowe, możemy zapisać ogólnie:

$$U = \sqrt{3} U_f \quad (43.15)$$

$$I = I_f$$

Oznacza to, że jeżeli $U_f = 230 \text{ V}$, to $U = 400 \text{ V}$.

Rozpatrzmy teraz odbiornik symetryczny połączony w trójkąt, jak na rys. 43.6. Jego wykres wskazowy przedstawia rys. 43.9.



Rys. 43.9. Wykres wskazowy symetrycznego odbiornika połączony w trójkąt

Na podstawie powyższych rysunków możemy stwierdzić, że prądy przewodowe są równe różnicy odpowiednich prądów fazowych:

$$\begin{aligned} I_A &= I'_{AB} - I'_{CA} \\ I_B &= I'_{BC} - I'_{AB} \\ I_C &= I'_{CA} - I'_{BC} \end{aligned} \quad (43.16)$$

za ogólne zależności pomiędzy prądami i napięciami fazowymi i przewodowymi następujące:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{3} I_f \\ U &= U_f \end{aligned} \quad (43.17)$$

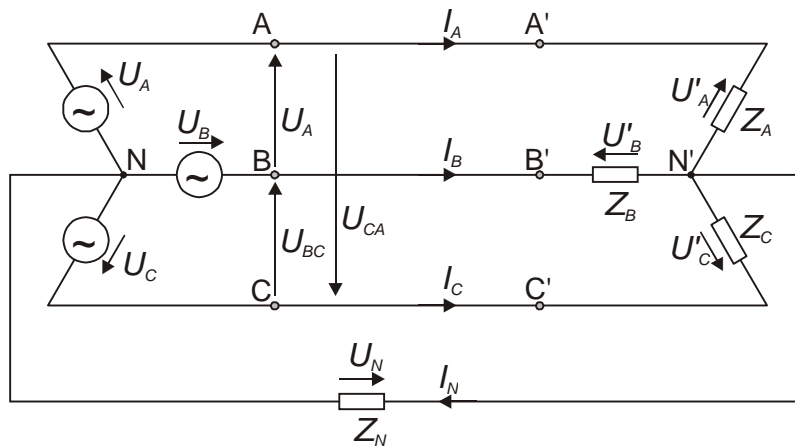
43.1.5 Układy trójfazowe niesymetryczne

W praktyce, oprócz omówionych wyżej układów symetrycznych, występują także układy niesymetryczne, zarówno gwiazdowe, jak i trójkątowe. Przy analizie takich układów zakładamy, że generator zasilający jest symetryczny i połączony w gwiazdę, natomiast niesymetria występuje po stronie odbiornika, na skutek różnych impedancji poszczególnych jego faz, bądź sytuacji awaryjnych w linii zasilającej - zwarcie lub przerwy.

43.1.5.1. Obliczanie układów trójfazowych.

Metoda obliczania układów trójfazowych jest następująca:

- jeżeli odbiornik połączony jest w trójkąt, zamieniamy go na równoważną gwiazdę,
- obliczamy napięcie \underline{U}_N pomiędzy punktami neutralnymi N i N' (gwiazdowymi) generatora i odbiornika (patrz rys.43.10),



Rys. 43.10. Czteroprzewodowy układ trójfazowy

Na podstawie praw Kirchhoffa można wykazać, że:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_A + \underline{Y}_B \underline{U}_B + \underline{Y}_C \underline{U}_C}{\underline{Y}_N + \underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (43.18)$$

gdzie:

$\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ - admitancje zespolone faz odbiornika

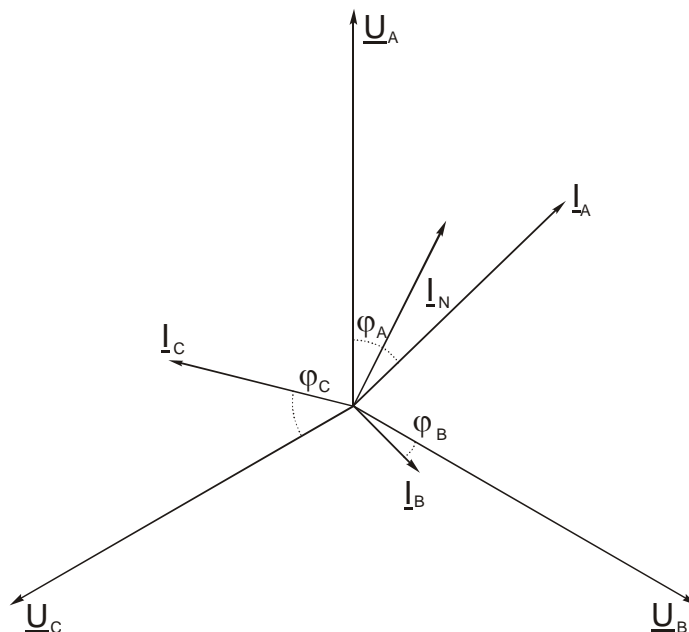
\underline{Y}_N - admitancja zespolona przewodu neutralnego.

W przypadku braku przewodu neutralnego (układ trójprzewodowy) $\underline{Y}_N = 0$.

Podobnie, w przypadku przerwy w fazie, jej admitancja jest równa zero.

- na podstawie obliczonego napięcia \underline{U}_N , korzystając z praw Kirchhoffa obliczamy rozprawy prądów i rozkład napięcia w analizowanym układzie. Prądy fazowe odbiornika połączony w gwiazdę wyrażają się następującymi wzorami:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_N}{\underline{Z}_A} \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_N}{\underline{Z}_B} \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_N}{\underline{Z}_C}. \quad (43.19)$$

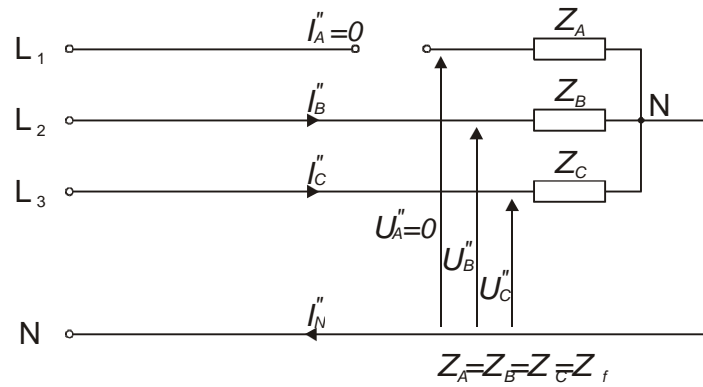


Rys. 43.11. Wykres wskazowy niesymetrycznego układu 4-przewodowego

43.1.5.2. Przerwa w jednym z przewodów zasilających symetryczny odbiornik trójfazowy.

Szczególnym, mającym duże znaczenie praktyczne, przypadkiem asymetrii jest **przerwa** w jednym z przewodów zasilających symetryczny odbiornik trójfazowy. Rozpatrzmy tu trzy przypadki: odbiornik połączony w gwiazdę, zasilany linią czteroprzewodową, linią trójprzewodową, oraz odbiornik połączony w trójkąt. Zakładamy, że obciążenie ma charakter rezystancyjno-indukcyjny, który najczęściej spotykany w praktyce.

a) Układ czteroprzewodowy ó odbiornik połączony w gwiazd



Rys. 43.12. Schemat połączenia symetrycznego odbiornika gwiazdowego, zasilanego linią czteroprzewodową z przerwą w jednym przewodzie

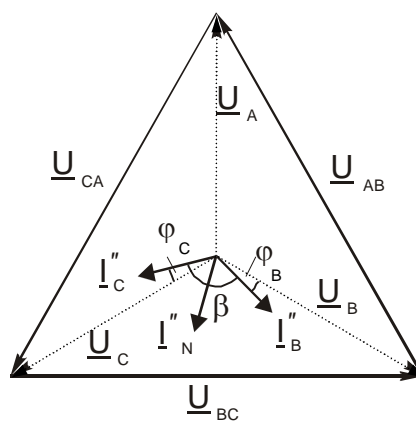
Na skutek przerwy w fazie A prąd w tej fazie, oraz napięcie fazowe są równe zero. Prądy w pozostałych fazach wynoszą :

$$\underline{I}''_B = \frac{\underline{U}''_B}{\underline{Z}_B} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B} \quad \text{i} \quad \underline{I}''_C = \frac{\underline{U}''_C}{\underline{Z}_C} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C} \quad (43.20)$$

Tak więc prądy w fazach nieuszkodzonych są takie same, jak w normalnych warunkach pracy. Ich suma geometryczna jest równa wartości zespolonej prądu w przewodzie neutralnym:

$$\underline{I}''_B + \underline{I}''_C = \underline{I}''_N \quad (43.21)$$

Wykres wektorowy układu czteroprzewodowego przedstawia rys.43.13.



Rys. 43.13. Wykres wskazowy układu z rys. 43.12.

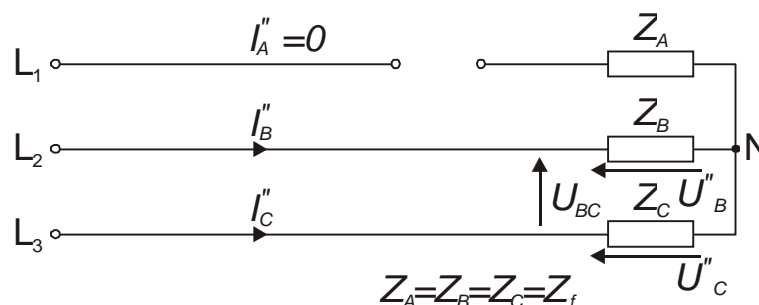
Na podstawie wykresu można wykazać, że wartość skuteczna prądu w przewodzie neutralnym jest równa:

$$I_N'' = \sqrt{I_A''^2 + I_C''^2 - 2I_B''I_C''\cos(180^\circ - \beta)} \quad (43.22)$$

gdzie β - kąt między wskazami prądów I_B'' oraz I_C'' .

Z powyższego wzoru wynika, że maksymalna wartość skuteczna prądu w przewodzie neutralnym występuje przy równych obciążeniach obu faz, lub przy całkowitym obciążeniu jednej z nich.

b) Układ trójprzewodowy z odbiornikiem połączonym w gwiazdę



Rys. 43.14. Schemat połączenia symetrycznego odbiornika gwiazdowego, zasilanego linią trójprzewodową z przerwą w jednej fazie

Z powyższego schematu wynika, że trójprzewodowy układ gwiazdowy po przerwaniu jednej fazy przekształca się w układ dwuprzewodowy zasilany napięciem międzyprzewodowym U_{BC} . Z uwagi, że prąd $I_A'' = 0$, więc napięcie fazowe $U_A'' = 0$. Napięcie neutralne U_N układu wynosi:

$$\underline{U}_N'' = \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_A + \underline{Y}_B \underline{U}_B + \underline{Y}_C \underline{U}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \frac{\underline{Y}_f (\underline{U}_B + \underline{U}_C)}{2\underline{Y}_f} = \frac{\underline{U}_B + \underline{U}_C}{2}. \quad (43.23)$$

Stąd napięcia fazowe są równe odpowiednio:

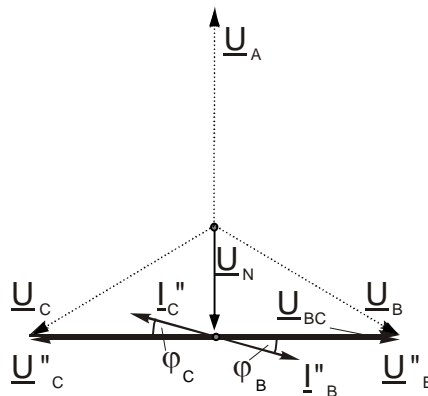
$$\underline{U}_B'' = \underline{U}_B - \underline{U}_N'' = \underline{U}_B - \frac{\underline{U}_B + \underline{U}_C}{2} = \frac{\underline{U}_{BC}}{2}, \quad (43.24)$$

$$\underline{U}_C'' = \underline{U}_C - \underline{U}_N'' = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_B}{2} = -\frac{\underline{U}_{BC}}{2}.$$

Natomiast w obu pozostałych fazach prąd jest taki sam, co do wartości skutecznej, prąd fazowy, określony wzorem:

$$\underline{I}_B'' = -\underline{I}_C'' = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_C} = \frac{\underline{U}_{BC}}{2\underline{Z}_f}. \quad (43.25)$$

Wykres wskazowy układu trójprzewodowego przedstawia rys. 43.15.



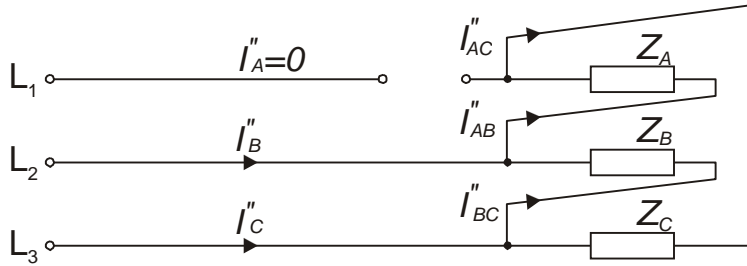
Rys. 43.15. Wykres wskazowy układu z rys. 43.14.

Wartość skuteczna prądu fazowego wynosi zatem :

$$I_f'' = \frac{U_{BC}}{2Z_f} = \frac{\sqrt{3}U_f}{2Z_f} = 0,87 \times I_f \quad (43.26)$$

gdzie I_f - wartość skuteczna prądu fazowego w układzie symetrycznym.

c) Odbiornik połączony w trójkąt Δ .



Rys. 43.16. Schemat połączenia odbiornika trójkątowego z przerwą w jednym przewodzie zasilającym

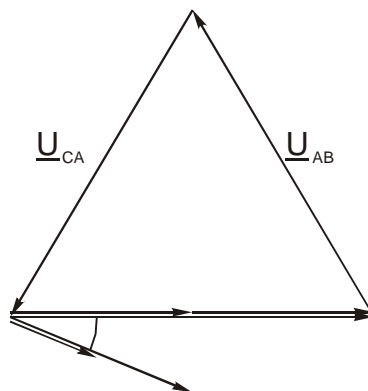
Na podstawie powyższego schematu możemy stwierdzić, że napięcie \underline{U}_{BC} , oraz prąd w drugiej fazie nie ulegną zmianie.

$$\underline{I}_{BC}'' = I_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{Z_f} \quad (43.27)$$

Natomiast prądy w fazach pierwszej i trzeciej są jednakowe i równe połowie prądu fazy drugiej:

$$\underline{I}_{AB}'' = \underline{I}_{CA}'' = \frac{\underline{U}_{BC}}{2Z_f} \quad (43.28)$$

Wykres wektorowy omawianego układu przedstawia rys. 43.17.



Rys. 43.17. Wykres wskazowy układu z rys. 43.16.

Na skutek przerwania przewodu - faza prądu I_{AB} , zmieniła się o 120° . W podobny sposób o 120° zmieniła się faza prądu I_{CA} . Napiecie fazy pierwszej i trzeciej, podobnie jak prądy, zmniejszyły się o połowę, a ich wskaźniki obróciły się odpowiednio o -120° i $+120^\circ$.

$$\underline{U}_{AB}'' = \underline{U}_{CA}'' = \underline{I}_{AB}'' \times \underline{Z}_f = \frac{I_{AB}}{Z_f} = \frac{U_{BC}}{2} . \quad (43.29)$$

Wartości zespolone prądów przewodowych są określone wzorami:

$$I_B'' = I_{BC} - (-I_{AB}'') , \quad (43.30)$$

$$I_C'' = -I_{CA} - I_{BC} .$$

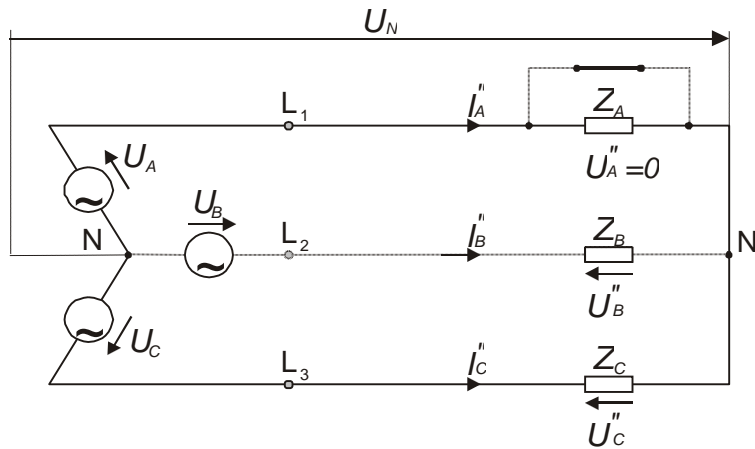
Stąd:

$$I_B'' = I_{BC} + \frac{I_{BC}}{2} = \frac{3}{2} I_{BC} , \quad (43.31)$$

$$I_C'' = -I_{BC} - \frac{I_{BC}}{2} = -\frac{3}{2} I_{BC} .$$

43.1.5.3. Zwarcie w jednej z faz odbiornika połączonych w gwiazdę, zasilanego z linii 3-przewodowej.

Innym przypadkiem asymetrii jest **zwarcie** w jednej z faz odbiornika połączonych w gwiazdę, zasilanego z linii 3-przewodowej. Schemat w tym przypadku przedstawia rys.43.18.



Rys. 43.18. Zwarcie w fazie A odbiornika gwiazdowego w linii 3-przewodowej

Na podstawie wzorów (43.19) prądów fazowych przed wystąpieniem zwarcia wynosi odpowiednio:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_N}{\underline{Z}_A} \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_N}{\underline{Z}_B} \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_N}{\underline{Z}_C} \quad (43.32)$$

Po zwarciu w fazie A, napięcie pomiędzy punktami neutralnymi generatora i odbiornika staje się równe napięciu \underline{U}_A :

$$\underline{U}_N = \underline{U}_A \quad (43.33)$$

Podstawiając to zależność do wzorów (43.32) otrzymujemy:

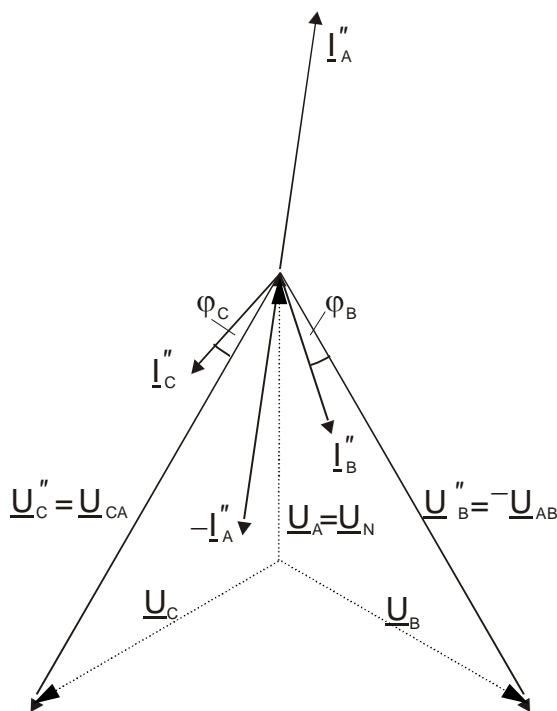
$$\underline{I}_B // = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_A}{\underline{Z}_B} = -\frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{\underline{Z}_B} = -\frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_B} \quad (43.34)$$

$$\underline{I}_C // = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_A}{\underline{Z}_C} = -\frac{\underline{U}_A - \underline{U}_C}{\underline{Z}_C} = -\frac{\underline{U}_{AC}}{\underline{Z}_C} \quad .$$

Natomiast z I prawa Kirchhoffa otrzymamy:

$$\underline{I}_A'' = -(\underline{I}_B'' + \underline{I}_C'') = -\left(\frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_B} - \frac{\underline{U}_{AC}}{\underline{Z}_C}\right) = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_B} + \frac{\underline{U}_{AC}}{\underline{Z}_C}. \quad (43.35)$$

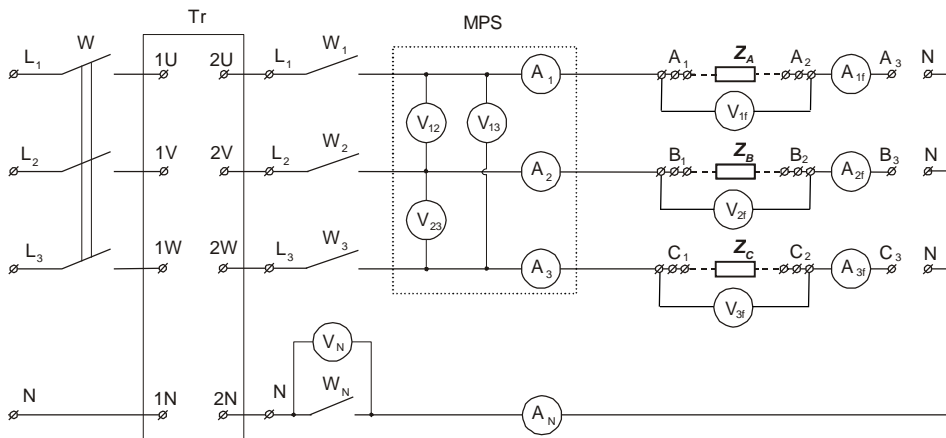
Z powyższych równań wynika, że na odbiornikach faz B i C wystąpi napięcie wyższe (400V w przypadku sieci o napięciu fazowym 230V), które może spowodować ich uszkodzenie. Wykres wektorowy układu przedstawia rys.43.19.



Rys. 43.19. Wykres wektorowy odbiornika gwiazdowego ze zwarcie w jednej fazie, zasilanego z linii 3-przewodowej.

43.2. Badania laboratoryjne.

Pomiary nale y wykona w ukłdzie przedstawionym na rys. 43.20.



Rys. 43.20. Schemat ukłdu pomiarowego do badania ukłdów trójfazowych

Oznaczenia:

V_{1f} , V_{2f} , V_{3f} , V_N ó woltomierze cyfrowe

A_{1f} , A_{2f} , A_{3f} , A_N ó amperomierze cyfrowe

W , W_1 , W_2 , W_3 , W_N ó wyœczniki

Z_A , Z_B , Z_C ó impedancje fazowe odbiornika 3-fazowego

Tr ó transformator trójfazowy obni aj cy napi cie

MPS ó miernik parametrów sieci

(pomiar napi ci trzyprzewodowych: V_{12} , V_{13} , V_{23} ,

pomiar pr dów przewodowych: A_1 , A_2 , A_3)

Uwaga: Warto ci pr dów fazowych **nie powinny przekracza 2 A** z uwagi na ograniczenia wynikaj ce z zakresu cewki pr dowej watomierza

43.2.1 Wyznaczenie kolejności faz sieci zasilającej

Do punktów L_1 , L_2 , L_3 podłączy zastępczy wskaźnik kolejności faz z kondensatorem (kondensator dołączy do punktu L_1). Następnie zamknij wyłącznik W . Sprawdź, czy kolejność faz jest zgodna. W przypadku ustalenia kolejności przeciwnej należy, po uprzednim wyłączeniu zasilania, zamienić miejscami dwa dowolne przewody na zaciskach L_{1-3} .

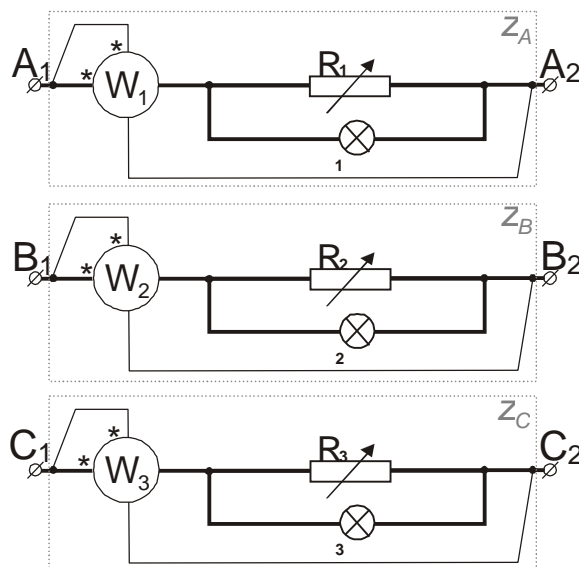
Po włączeniu zasilania należy sprawdzić, czy kolejność faz po przeprowadzonej zmianie jest zgodna.

Opracowanie wyników pomiarów:

Opisz zaobserwowane wskazania przyrządów.

43.2.2 Badanie odbiornika połączzonego w gwiazdę \star .

Pomiędzy parą punktów A_1 i A_2 , B_1 i B_2 , C_1 i C_2 włącz obwody odbiorników fazowych Z_A , Z_B , Z_C wraz z układem do pomiaru mocy zgodnie z rysunkiem 43.21.



Rys. 43.21. Odbiorniki fazowe w układzie do pomiaru mocy

Oznaczenia: R_1, R_2, R_3 – rezystory suwakowe,
 $1, 2, 3$ – żarówki sygnalizacyjne,

W_1, W_2, W_3 ó watomierze.

Jako odbiornik w wiczeniu zastosowano rezystory suwakowe, poćzone równolegle z arówkami sygnalizacyjnymi. Rezystory umo liwiają pćnn regulacj warto ci skutecznych pr dów fazowych. Odbiorniki Z_A, Z_B, Z_C maj charakter rezystancyjno-indukcyjny. W celu wyznaczenia k tów przesuni cia fazowego pomi dzy napi ciami a pr dami odbiornika zastosowano metod pomiaru mocy czynnej watomierzem. Znajomo tych k tów jest niezb dna do obliczenia napi cia U_0 oraz narysowania wykresu wskazowego ukćdu trójfazowego.

Poćczy odbiorniki w ukćdach do pomiaru mocy (rys.43.21) w gwiazd .

Wykona pomiary wszystkich pr dów i napi w podanych ni ej przypadkach:

- 1) Ukćd **4-przewodowy symetryczny**.
Nastawi rezystorami jednakowe warto ci pr dów fazowych .
Proponowane nastawy $(1 \div 2) A$. (Zaćczone: W_1, W_2, W_3, W_N i W)
- 2) Ukćd **4-przewodowy z przerw w jednej fazie**.
Otworzy wyćcznik w wybranym przewodzie fazowym
np. W_1 . (Zaćczone: W_2, W_3, W_N i W)
- 3) Ukćd **3-przewodowy symetryczny**. Zamkn wyćcznik W_1 .
Otworzy wyćcznik W_N . (Zaćczone: W_1, W_2, W_3 i W)
- 4) Ukćd **3-przewodowy z przerw w jednej fazie**.
Otworzy wyćcznik w wybranym przewodzie fazowym
np. W_1 . (Zaćczone: W_2, W_3 i W)
- 5) Ukćd **3-przewodowy ze zwarcie w jednej fazie**.
Otworzy wyćczniki W, W_1, W_2, W_3 . Zewrze przewodem wybrany odbiornik
np. A_1 z A_2 . Wćczy zasilanie. (Zaćczone: W_1, W_2, W_3 i W)

Wyniki pomiarów zestawí w tabeli 1a i 1b.

Tabela 1a.

Parametry przewodowe

	U ₁₂	U ₂₃	U ₃₁	U _N	I ₁	I ₂	I ₃	I _N
	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								

Tabela 1b.

Parametry fazowe

	U _{1F}	U _{2F}	U _{3F}	I _{1F}	I _{2F}	I _{3F}	P _{1F}	P _{2F}	P _{3F}
	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[W]	[W]	[W]
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									

Opracowanie wyników pomiarów:

Na podstawie uzyskanych wyników należy:

- sprawić zgodność pomiarów napięć fazowych i przewodowych układu symetrycznego,
- obliczyć całkowite impedancje obciążenia poszczególnych faz, korzystając z następujących wzorów:

$$Z_f = \frac{U_f}{I_f}, \quad \varphi_f = \arccos \frac{P_f}{U_f \times I_f}, \quad (43.36)$$

gdzie:

U - wskazanie woltomierza mierzącego napięcie na obciążeniu danej fazy,*I* - wskazanie amperomierza mierzącego prąd obciążenia danej fazy,*Z* - moduł całkowitej impedancji obciążenia danej fazy,*φ* - kąt pomiędzy wskazaniem napięcia i prądu danej fazy.

c) korzystając z wykonanych obliczeń narysować dla wybranych punktów pomiarowych wykresy wskazowe napięć i prądów.

Należy podać przykładowe obliczenia i wyniki wszystkich obliczeń zestawiając w tabeli 2 :

Tabela 2.

Zestawienie wyników obliczeń dla odbiornika połączzonego w gwiazdę.

	Z_A	φ_A	Z_B	φ_B	Z_C	φ_C
	[Ω]	[$^\circ$]	[Ω]	[$^\circ$]	[Ω]	[$^\circ$]
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

43.2.3 Badanie odbiornika połączzonego w trójkąt Δ .

Połączyć odbiorniki w układach do pomiaru mocy (rys.43.21) w trójkąt. Wykonać pomiary wszystkich prądów i napięć w podanych niżej przypadkach:

- 1) Układ **3-przewodowy symetryczny**. Nastawić jednakowe wartości prądów fazowych. (Załączone: W_1, W_2, W_3 i W)
- 2) Układ **3-przewodowy z przerwą w jednej fazie**. Otworzyć wyłącznik w jednym przewodzie fazowym np. W_1 . (Załączone: W_2, W_3 i W)

Wyniki pomiarów zestawiać w tabeli 3a i 3b:

Tabela 3a.

Parametry przewodowe

	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3
	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]
1.						
2.						

Tabela 3b.

Parametry fazowe

	U_{1F}	U_{2F}	U_{3F}	I_{1F}	I_{2F}	I_{3F}	P_{1F}	P_{2F}	P_{3F}
	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[W]	[W]	[W]
1.									
2.									

Opracowanie wyników pomiarów.

Na podstawie uzyskanych wyników należy:

- sprawdzi teoretyczne zależności pomiarowe wartościami skutecznymi prądów i napięć przewodowych i fazowych w układzie trójfazowym,
- obliczyć na podstawie wskazań woltomierzy i amperomierzy całkowite impedancje obciążenia poszczególnych faz,
- korzystać z wykonanych obliczeń narysować dla wybranych punktów pomiarowych wykresy wskazowe napięć i prądów.

Należy podać przykładowe obliczenia i wyniki wszystkich obliczeń zestawiając w tabeli 4:

Tabela 4

Zestawienie wyników obliczeń dla odbiornika połączzonego w trójkąt

	Z_A	φ_A	Z_B	φ_B	Z_C	φ_C
	[Ω]	[$^\circ$]	[Ω]	[$^\circ$]	[Ω]	[$^\circ$]
1.						
2.						

43.3. Uwagi i wnioski.

W sprawozdaniu należy zamieścić: tabele pomiarów i obliczeń, przykładowe obliczenia, odpowiednie wykresy wskazowe, uwagi dotyczące przebiegu ćwiczenia i komentarz do uzyskanych wyników.

Porównaj wyniki z zależnościami teoretycznymi. Uzasadnij ewentualne rozbieżności. Wnioski powinny mieć charakter konkretny i zawierać jasne spostrzeżenia. Należy unikać stwierdzeń werbalnych, zaczerpniętych z literatury.

Literatura

- [1] Krakowski M.: Elektrotechnika teoretyczna. Tom 1. Obwody liniowe i nieliniowe. PWN, Warszawa, 1999.
- [2] Praca zbiorowa "Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków".
- [3] WNT, Warszawa, 1995.

Przedstawienie wielko ci sinusoidalnych za pomoc liczb zespolonych

Obliczanie obwodów prądu sinusoidalnego ulega znacznemu uproszczeniu przy zastosowaniu liczb zespolonych. Oznaczmy jedno urojone przez j ; stosowane w matematyce oznaczenie jedno ci urojonej symbolem i jest niewygodne w elektrotechnice, ponieważ i oznacza wartość chwilową prądu. Liczb zespolony z przedstawia się w postaci:

$$\underline{z} = a + jb,$$

gdzie $a = \text{Re}\{\underline{z}\}$ jest częścią rzeczywistą, a $b = \text{Im}\{\underline{z}\}$ jest częścią urojoną liczby zespolonej.

Powyższe wyrażenie liczby zespolonej jest postaci algebraicznej. Liczb zespolony można przedstawić również w postaci wykładniczej:

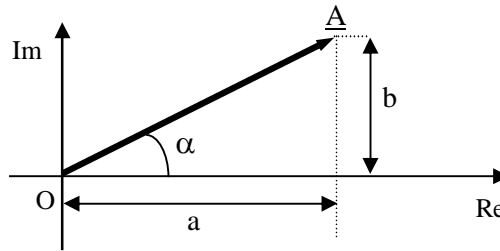
$$\underline{z} = z e^{j\alpha},$$

lub trygonometrycznej:

$$\underline{z} = z (\cos\alpha + j \sin\alpha),$$

przy czym $z = \sqrt{a^2 + b^2}$ jest modułem liczby zespolonej, za $\alpha = \arctg \frac{b}{a}$ jest argumentem liczby zespolonej.

Obrazem geometrycznym liczby zespolonej z jest na płaszczyźnie zespolonej wektor \underline{OA} (patrz rysunek).



Rys. 43.22. Obraz geometryczny liczby zespolonej.

Przejdź od postaci wykładniczej do postaci trygonometrycznej umożliwia wzór Eulera:

$$e^{j\alpha} = \cos\alpha + j \sin\alpha.$$

Na podstawie powyższego wzoru przy uwzględnieniu, że 2π jest okresem funkcji trygonometrycznej, otrzymujemy

$$e^{j(\alpha+k\cdot 2\pi)} = e^{j\alpha}, \quad k=1, 2, \dots,$$

skąd wynika, że argument liczby zespolonej nie jest jednoznacznie określony, lecz przybiera wartości różniące się o dowolną wielokrotność 2π .

Na podstawie powyższej analizy, napięcie $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$, oraz prąd $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$, można przedstawić w postaci zespolonej w następujący sposób:

$$\underline{U}_{mt} = U_m e^{j(\omega t + \varphi_u)}, \text{ oraz } \underline{I}_{mt} = I_m e^{j(\omega t + \varphi_i)}.$$

Wartości chwilowe u oraz i otrzymuje się przez wyodrębnienie części urojonej wyrażenia, a więc $u = \text{Im} \{ \underline{U}_{mt} \}$, $i = \text{Im} \{ \underline{I}_{mt} \}$.

Wartości zespolone (symboliczne) napięcia i prądu określają odpowiednie wyrażenia:

$$\underline{U} = U e^{j\varphi_u}, \text{ oraz } \underline{I} = I e^{j\varphi_i}.$$

Moduł wartości zespolonej oraz jej argument równają się odpowiednio wartości skutecznej oraz fazie wielkości sinusoidalnej.

