



Politechnika Wroclawska

Ćwiczenie 2

Wydział

Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

LABORATORIUM
PODSTAW ELEKTROTECHNIKI

Pomiary mocy i energii w sieciach jednofazowych i
trójfazowych

Zagadnienia do przygotowania

- Układy sieci zasilania.
- Układy pomiarowe -jedno i -trójfazowe.
- Poziomy napięcie w układach -jedno i -trójfazowych.
- Co to jest moc czynna, bierna, pozorna (trójkąt mocy) i w jakich jednostkach jest wyrażona?
- Wykresy wektorowe napięć i prądów dla takich układów.
- Odbiory symetryczne i niesymetryczne w układach -trójfazowych.

Literatura

- [1] B. Karolewski, Z. Okraszewski, A. Szymański „Elektrotechnika Ćwiczenia laboratoryjne dla wydziałów nieelektrycznych. Skrypt PWr
- [2] Bogdan Miedziński „ELEKTROTECHNIKA Podstawy i instalacje elektryczne”
wydawnictwo WNT

Celem ćwiczenia jest poznanie metod pomiaru mocy czynnej i pozornej odbiorników symetrycznych i niesymetrycznych. Program ćwiczenia obejmuje pomiary mocy i energii odbiorników w sieciach jednofazowych oraz trójfazowych trójprzewodowych i czteroprzewodowych.

1. Wprowadzenie

1.1. Budowa i działanie watomierza.

Pomiar mocy odbywa się z zastosowaniem przyrządów zwanych watomierzami. Budowa ustroju pomiarowego watomierza opiera się na dwóch cewkach: ruchomej napięciowej oraz nieruchomej prądowej. Cewka prądowa posiada niewielką liczbę zwojów nawiniętych drutem o dużym przekroju i ma niewielką rezystancję. Cewkę tę do obwodu włącza się szeregowo tak jak amperomierz. Cewka napięciowa ma dużą rezystancję i posiada dużą liczbę zwojów nawiniętych cienkim drutem. Cewkę tę włącza się podobnie jak woltomierz, czyli równolegle do odbiornika. Siły elektrodynamiczne działające na cewkę, w których płyną prądy w zgodnych kierunkach powodują przyciąganie się boków cewek i odpychanie tych, w których kierunki prądów są przeciwne. Pod wpływem powstałych sił uzyskujemy moment obrotowy proporcjonalny do iloczynu skutecznych wartości prądów płynących w obu cewkach i do kosinusa kąta między ich wektorami. Prąd pojawiający się w cewce napięciowej jest proporcjonalny do napięcia, więc wychylenie wskazówki można przedstawić zależnością

$$a = \frac{UI \cos \varphi}{c_w} \quad (1.1)$$

gdzie: a - wychylenie wskazówki w działkach, c_w - stała watomierza [W/dz], $\varphi = \angle (U, I)$

Pomiary mocy czynnej odbywają się przede wszystkim z użyciem watomierzy, jak wynika ze wzoru (1.2) wartość mierzonej mocy jest iloczynem wychylenia wskazówki i stałej watomierza.

$$P = c_w a, \quad (1.2)$$

Stać watomierza to iloczyn znamionowych wartości prądu I_n i napięcia U_n podzielny przez maksymalne wychylenie (zakres skali) a_{max} :

$$c_w = \frac{U_n I_n}{a_{max}} \quad (1.3)$$

Zmiana konfiguracji w układzie pomiarowym tak, aby kąt przyrządu różnił się o 90° od kąta mocy odbiornika na przykład poprzez zmianę między wektorami napięcia i prądu doprowadzonymi do urządzenia sprawi, że watomierzem można mierzyć moc bierną. Moc pozorną natomiast wyznacza się ze wskazań amperomierza i woltomierza. Wskazania tych przyrządów determinują nastawienie zakresów pomiarowych prądu i napięcia watomierza **(przekroczenie ustawionych wartości może doprowadzić do uszkodzenia watomierza)**.

1.2. Sieci niskiego napięcia

Typowymi sieciami, niskiego napięcia są sieci czteroprzewodowe (TN-C), pięcioprzewodowe (TN-S) oraz w warunkach przemysłowych i kopalnianych sieci trójprzewodowe (IT).

Poszczególne litery są skrótami od wyrażeń:

T – terre (franc.) – ziemia, uziemiony,

N – neutre (franc.) – neutralny,

I – isolate (franc.) – izolować, izolowany,

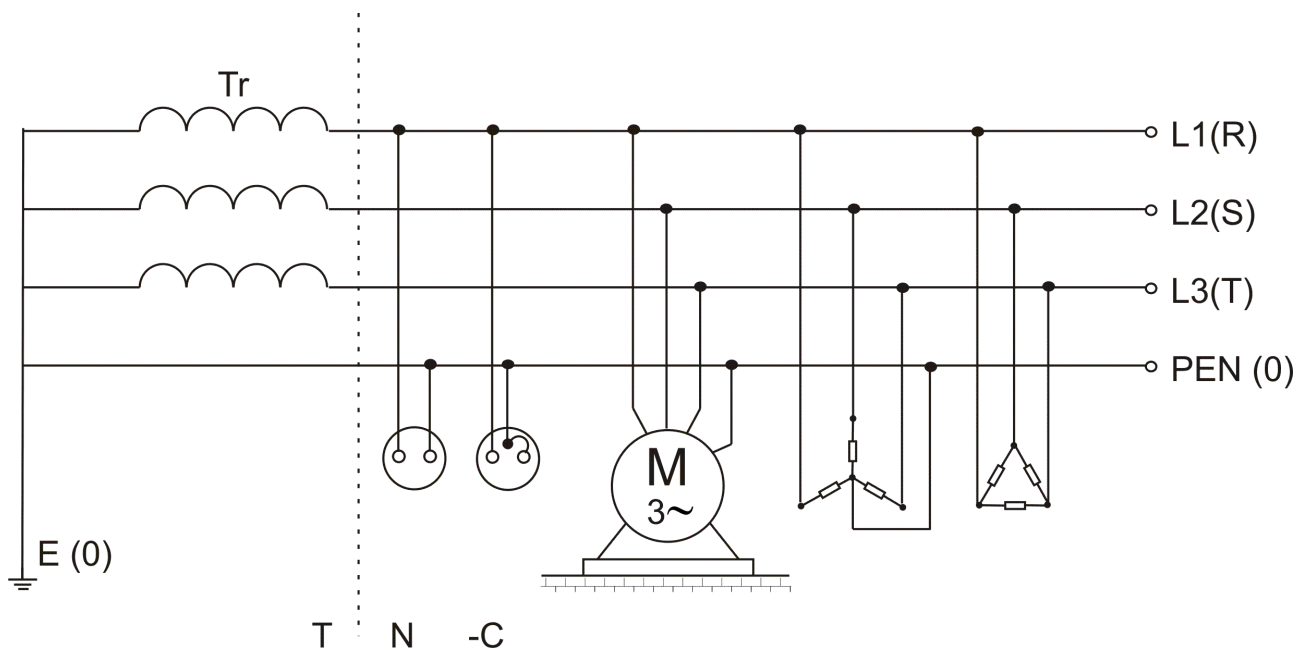
C – combine (franc.) – łączyć, wiązać, połączony,

S – separe (franc.) – rozdzielać, oddzielać.

Układ sieci TN-C

Układ ten jest powszechnie stosowany do rozdziału energii elektrycznej w budynkach $3 \times 230/400$ oraz do zasilania symetrycznych odbiorników 3-fazowych.

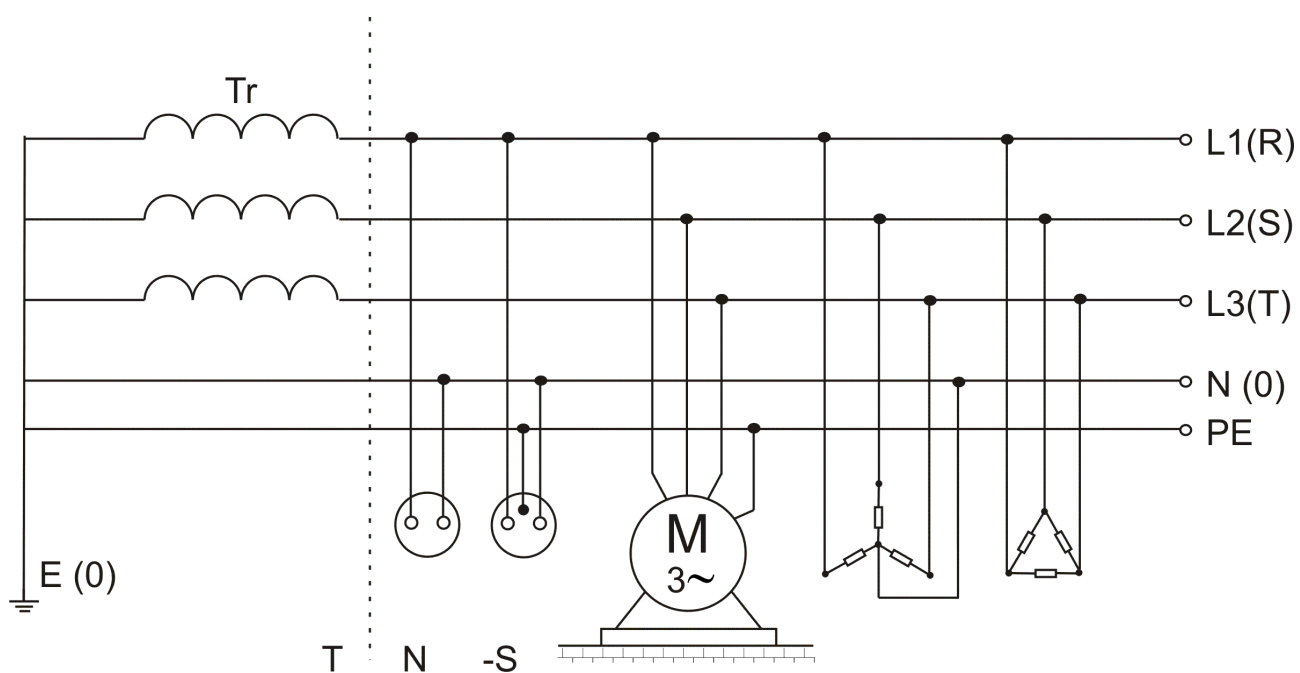
W całym układzie sieci TN-C (rys.1) funkcje przewodu neutralnego (N) i ochronnego (PE) pełni jeden wspólny przewód ochronno-neutralny (PEN). Z uwagi na to, że układ TN-C nie spełnia wymagań odnośnie kompatybilności elektromagnetycznej ze względu na niekontrolowany rozptyw prądu roboczego płynącego w przewodzie PEN na przewodzące elementy konstrukcyjne obiektu oraz możliwość pojawienia się napięcia fazowego na przewodzących obudowach odbiorników jednofazowych przyłączonych za miejscem uszkodzenia izolacji sieci. Układ ten sukcesywnie jest zastępowany układem TN-S



Rys.1 Schemat układu sieciowego TN-C

Układ sieci TN-S

W całym układzie sieci TN-S (rys. 2) stosowany jest oddzielny przewody ochronny (PE). Przewód neutralny (N) jest odseparowany od ochronnego. Układ TN-S nie posiada wad sieci TN-C, a zastosowanie dwóch linii zasilających i automatycznego SZR (samoczynnego załączenia rezerwy) znacznie zwiększa pewność zasilania. Układ TN-S jest rekomendowany do zasilania urządzeń z wysokimi wymaganiami odnośnie kompatybilności elektromagnetycznej.

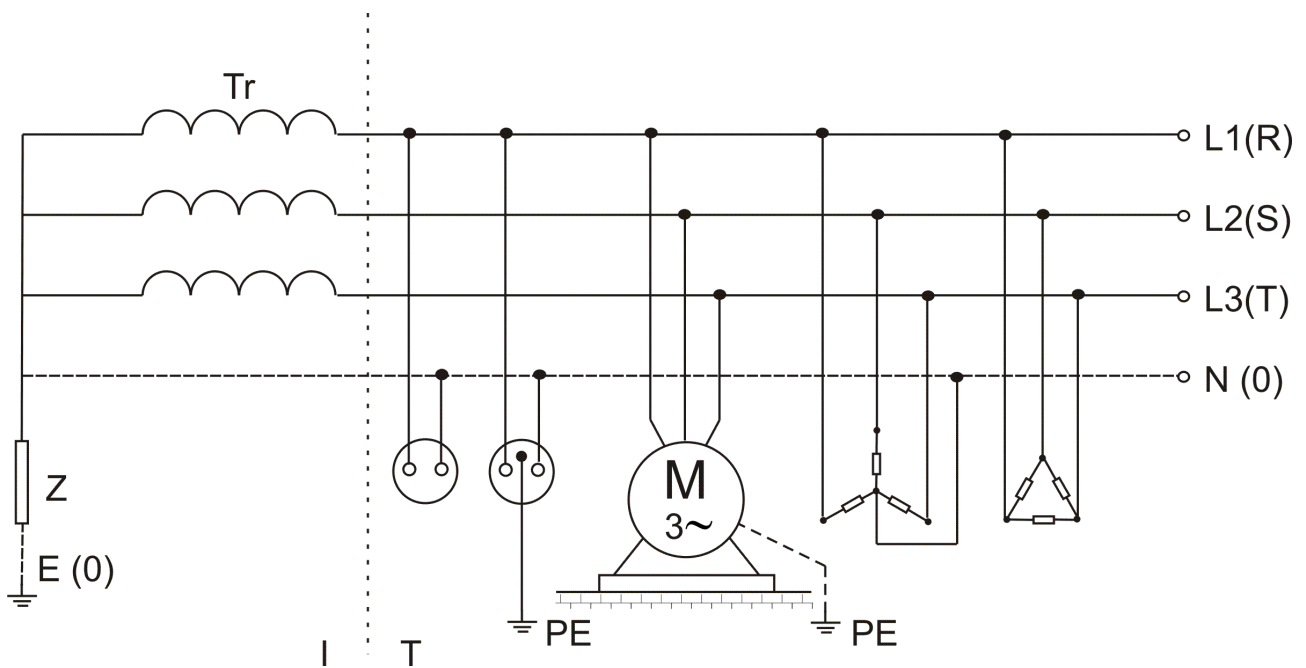


Rys.2 Schemat układu sieciowego TN-S

Układ sieci IT

W systemie IT (rys. 3.) wszystkie części czynne są odizolowane od ziemi albo jeden punkt jest przyłączony do ziemi poprzez impedancję lub bezpiecznik iskiernikowy, (który w czasie normalnej pracy sieci zapewnia przerwę izolacyjną, pomiędzy punktem neutralnym N a ziemią), a części przewodzące dostępne są uziemione niezależnie od siebie albo wspólnie, lub są przyłączone do uziemienia układu sieci. Układ może być odizolowany od ziemi. Przewód neutralny może być wyprowadzony lub nie. System IT w porównaniu z sieciami TN i TT (z punktem neutralnym bezpośrednio uziemionym) zalecany jest głównie, gdy wymagana jest wysoka niezawodność zasilania (pojedyncze zwarcie przewodu fazowego na obudowę urządzenia odbiorczego nie powoduje zatrzymania pracy układu), zwiększone bezpieczeństwo pod względem porażeniowym i pożarowym (cechą tego układu jest fakt, iż nawet bezpośrednie dotknięcie jednego przewodu fazowego nie powoduje porażenia). Dodatkową zaletą jest możliwość pracy systemu IT przy stosunkowo dużej rezystancji uziemienia. Stosowany jest obligatoryjnie w górnictwie, w zagrożonych wybuchem lub pożarem oddziałach chemicznych, w wielu gałęziach przemysłu i w szpitalach sale operacyjne, oddziały intensywnej opieki medycznej itp.. Układ wymaga ciągłej kontroli wartości rezystancji izolacji, aby dostatecznie wcześnie stwierdzić pojedyncze zwarcie przewodu czynnego do ziemi. Przykładowo w sieciach górniczych w przypadku zastosowania transformatora 6kV/500V w miejscu impedancji punktu gwiazdowego (Z) instaluje się z centralne zabezpieczenie

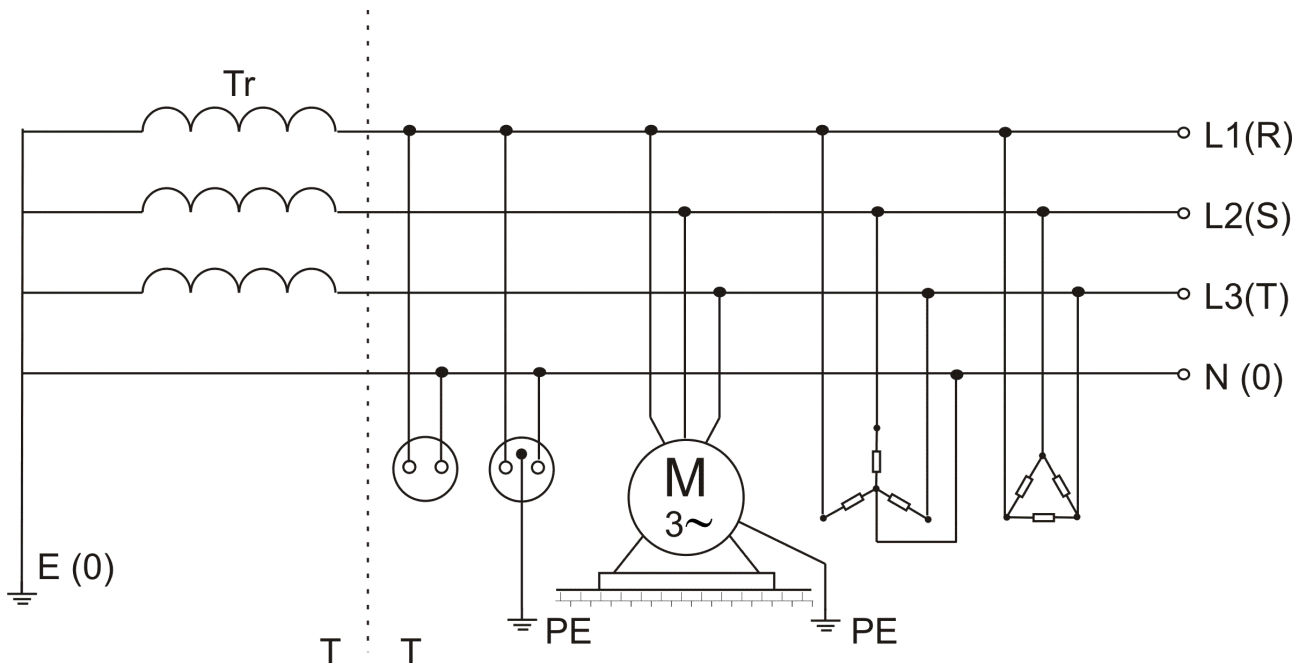
upływowe (CZU), które ma spowodować samoczynne, bezzwłoczne wyłączenie sieci spod napięcia, gdy wartość wypadkowa rezystancji izolacji doziemnej obniży się poniżej wartości granicznej. Rezystancja zadziałania centralnego zabezpieczenia upływowego nie powinna przekraczać dla sieci o napięciu znamionowym 500 V 15 k Ω (dla pozostałych: 4 k Ω (\leq 127 V), 7 k Ω (220 V), 30 k Ω (1000 V)).



Rys.3 Schemat układu sieciowego IT

Układ sieci TT

Układ sieci TT ma jeden punkt bezpośrednio uziemiony, a części przewodzące dostępne instalacji są przyłączone do uziomu niezależnie elektrycznie od uziomu układu sieci.



Rys.4 Schemat układu sieciowego TT

W rozpatrywanych sieciach występują dwa poziomy napięć:

- napięcia fazowe U_F występują między przewodem zerowym a każdym z przewodów fazowych (aktualnie w sieciach niskiego napięcia 230 V),

- napięcia przewodowe (międzyfazowe) U między przewodami fazowymi (aktualnie w sieciach niskiego napięcia 400V),

Między napięciami przewodowym i fazowymi zachodzi zależność:

$$U = \sqrt{3}U_f \quad (1.4)$$

Jeśli odbiornik jest symetryczny, (ma w każdej fazie jednakową impedancję) to suma wektorów prądów fazowych jest równa zero, a w przewodzie neutralnym prąd nie płynie.

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0, \quad (1.5)$$

Dla odbiornika niesymetrycznego w przewodzie neutralnym pojawia się prąd wyrównawczy.

$$I_N = I_A + I_B + I_C \neq 0, \quad (1.6)$$

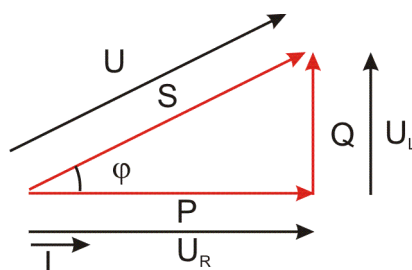
W sieci trójprzewodowej zarówno o obciążeniu symetrycznym jak i niesymetrycznym spełniony jest warunek:

$$I_A + I_B + I_C = 0, \quad (1.7)$$

1.3. Pomiary mocy odbiorników jednofazowych i trójfazowych

Pomiar mocy w układach odbiorników zasilanych napięciem przemiennym związany jest bezpośrednio z rodzajem i charakterem tych odbiorów. Dla odbiorników czysto rezystancyjnych (grzejniki, żarówki) mamy do czynienia jedynie z mocą czynną (P), natomiast dla idealnych odbiorników o charakterze pojemnościowym i indukcyjnym z mocą bierną (Q). Większość odbiorów pobiera zarówno moc czynną jak i bierną. Powszechnie stosowane silniki, transformatory i dławiki pobierają moc bierną indukcyjną. Moc czynna pobierana przez silniki zamieniana jest na pracę mechaniczną i narzucona jest przez warunki pracy, natomiast moc bierna wydatkowana jest na wytworzenie pola magnetycznego. Moc ta jest cyklicznie gromadzona i oddawana między polem magnetycznym silnika a źródłem zasilania, możliwe jest więc ograniczenie poboru tej mocy poprzez odpowiednie dobranie elementów kompensujących (pojemności). Wskaźnikiem udziału mocy czynnej w przesyłanej mocy pozornej jest

współczynnik mocy ($\cos\varphi$). Dla pełnego zrozumienia występujących tu zależności należy analogicznie do wprowadzonego w ćwiczeniu z obwodami RLC wykresu wektorowego napięć (trójkąt impedancji) wprowadzić wektorowe przedstawienie odpowiednich zależności poszczególnych mocy. Zależności te dla poszczególnych mocy (trójkąt mocy) widoczne są zwłaszcza dla układu szeregowego RLC gdzie umowny wektor przedstawiający prąd ma stałą wartość i kierunek dla wszystkich rozpatrywanych elementów.



Rys.5. Przykład zobrazowania trójkąta mocy na podstawie wektorów napięć i prądu.

Z przedstawionych na rys. 5 zależności można wyprowadzić następujące równania:

- moc czynna (jednostka [W])

$$P = UI\cos\varphi \quad (1.8)$$

- moc bierna (jednostka [var])

$$Q = UI\sin\varphi \quad (1.9)$$

- moc pozorna (jednostka [VA])

$$S = UI \quad (1.10)$$

Schemat połączenia przyrządów podczas pomiarów mocy w sieci jednofazowej przedstawiono na rys.5. Watomierz wskazuje moc czynną odbiornika

$$P = UI\cos\varphi \quad (1.11)$$

Moc pozorna odbiornika jest iloczynem wskazań woltomierza i amperomierza

$$S = UI \quad (1.12)$$

Moc bierną można obliczyć ze wzoru

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1.13)$$

Pomiaru mocy odbiorników trójfazowych pracujących w sieci czteroprzewodowej wykonuje się w zależności od charakteru obciążenia. Dla obciążenia symetrycznego zastosowany układ pomiarowy jest analogiczny do układu zastosowanego przy pomiarach w sieciach jednofazowych. Moce w poszczególnych fazach są sobie równe wystarczy zmierzyć moc jednej dowolnej fazy, a moc układu trójfazowego jest trzykrotnie większa.

$$P = 3P_f \quad (1.14)$$

$$S = 3U_f I_f \quad (1.15)$$

Wtedy:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1.16)$$

Analogicznie, gdy włączymy woltomierz między dwie fazy:

$$S = \sqrt{3} U I_f \quad (1.17)$$

W przypadku pomiaru mocy w sieci czteroprzewodowej z niesymetrycznym obciążeniem zastosowany układ pomiarowy powinien zawierać trzy zestawy przyrządów (analogicznie jak do pomiarów w układzie symetrycznym) mierzące moce w poszczególnych fazach. Moc układu trójfazowego jest sumą mocy z poszczególnych faz:

$$P = P_A + P_B + P_C \quad (1.18)$$

$$\begin{aligned} Q_A &= \sqrt{(U_A I_A)^2 - P_A^2} \\ Q_B &= \sqrt{(U_B I_B)^2 - P_B^2} \\ Q_C &= \sqrt{(U_C I_C)^2 - P_C^2} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Wtedy:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C \quad (1.20)$$

Moc pozorna:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.21)$$

Pomiary mocy czynnej odbiorników zarówno symetrycznych jak i niesymetrycznych w sieciach trójprzewodowych można wykonywać za pomocą dwóch watomierzy, połączonych w tzw. układ

Arona.

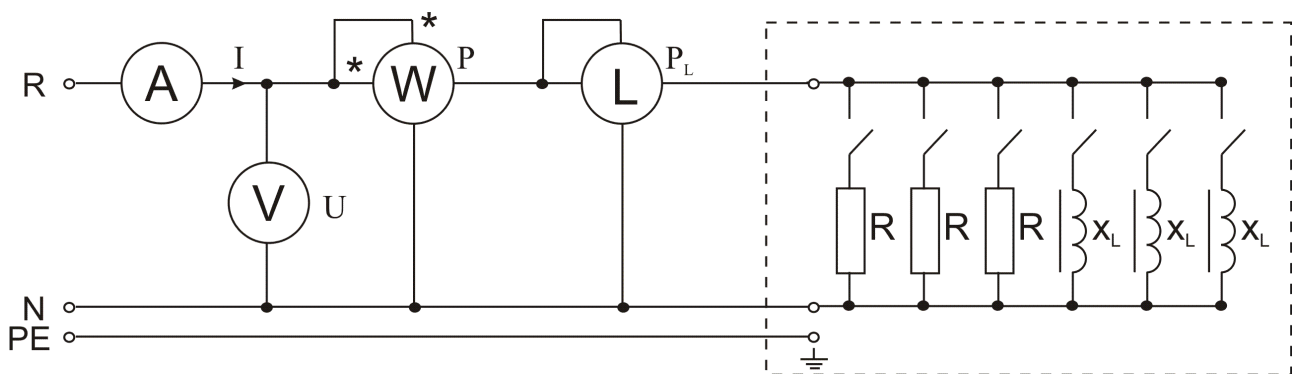
Pomiar wykonuje się według schematu pokazano na rys.8. Moc układu trójfazowego równa jest sumie wskazań watomierzy, dlatego w przypadku, gdy watomierz wychyla się w kierunku ujemnym należy zamienić kolejność doprowadzenia napięcia do cewki napięciowej watomierza i wynik pomiaru uwzględnić ze znakiem ujemnym.

$$P = P_1 \pm P_2 \quad (1.22)$$

1.4 Program ćwiczenia i sposób wykonania

1.4.1 Pomiary mocy i energii odbiornika jednofazowego

Po połączeniu układu pomiarowego wg schematu przedstawionego na rys.6. Mierzmy wartości prądu, napięcia oraz mocy czynnej przyjmując różne konfiguracje charakteru odbiornika jednofazowego (charakter rezystancyjny, indukcyjny). Po wykonanych pomiarach wyznaczamy moc pozorną i bierną odbiornika jednofazowego według zależności (1.12) i (1.13) oraz obliczymy jego współczynnik mocy ze wzoru (1.11).



Rys. 6. Przykład pomiaru mocy i energii dla odbiornika jednofazowego [1]

Rezystancją i reaktancją odbiornika obliczamy z zależności

$$R_{odb} = \frac{P}{I^2} \quad (1.23)$$

$$X_{odb} = \frac{Q}{I^2} \quad (1.24)$$

Wyniki dokonanych pomiarów i obliczeń zebrać w tabeli 1.1.

Tabela 1.1.

<i>Lp.:</i>	<i>Załączone człony odbiornika</i>	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Q</i>	<i>cosφ</i>	<i>φ</i>	<i>R_{odb}</i>	<i>X_{odb}</i>
		[V]	[A]	[W]	[V·A]	[var]	[-]	[°]	[Ω]	[Ω]
1	R =									
2	X =									
3	R i X									

Wartości rezystancji i reaktancji odbiornika wyznaczamy z danych modelu odbiornika. Wartości te porównujemy z R_0 i X_0 obliczonymi na podstawie pomiarów. Po obliczeniu wartości należy w odpowiedniej skali wykonać wykresy wektorowe prądów i napięć.

Dla różnych konfiguracji odbiornika należy zmierzyć czas obrotu tarczy licznika energii. Stoperem zmierzyć cykl obrotów obserwując położenie czerwonej kreski na tarczy licznika, wyznaczyć moc czynną wynikającą z pomiaru licznikiem z zależności

$$P_L = \frac{3600 \cdot n}{t_{c_L}} 10^3 \quad (1.25)$$

Gdzie: t - czas jednego obrotu tarczy licznika [s],

c_L - stała licznika, [obr/kWh],

n – liczba obrotów tarczy licznika.

Rezultaty pomiarów wykonane licznikiem energii przedstawić w tabeli 1.2.

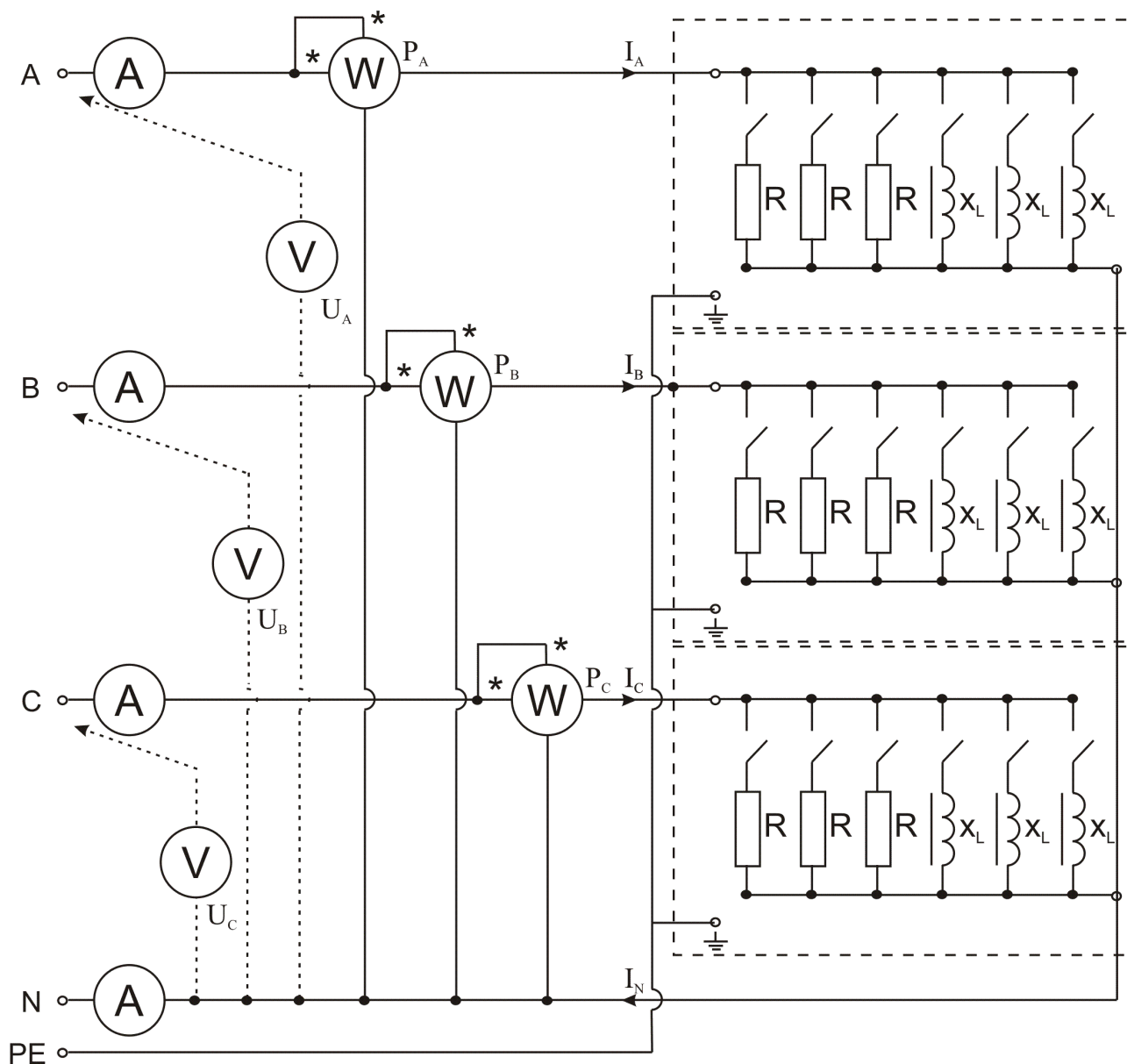
Tabela 1.2

<i>Lp.:</i>	<i>Załączone człony odbiornika</i>	<i>t</i>	<i>n</i>	<i>c_L</i>	<i>P_L</i>	<i>P</i>
		[s]	[-]	[obr/kWh]	[W]	[W]
1	R =					
2	X =					
3	R i X					

Wartości mocy uzyskanych z pomiaru watomierzem P i licznikiem P_L należy porównać i opisać we wnioskach.

1.4.2 Pomiary mocy odbiornika połączonego w gwiazdę zasilanego czteroprzewodowo

Według schematu obwodu pokazanego na rys. 7, wykonać pomiary dla kilku różnych połączeń odbiornika trójfazowego symetrycznego i niesymetrycznego.



Rys. 7. Pomiary mocy odbiornika trójfazowego zasilanego czteroprzewodowo

Moc czynną, bierną i pozorną odbiornika wyznaczone z zależności podanych we wprowadzeniu do ćwiczenia, Pomiar odpowiedniego napięcia wykonuje prowadzący, załączając woltomierz do poszczególnych faz. Wartości pomierzone przedstawić w tabeli 1.3 oraz tabeli 1.5, zaś wyniki obliczeń w tabelach 1.4. oraz 1.6-1.7

Tabela 1.3.

<i>Lp.:</i>	<i>Załączone człony odbiornika symetrycznego w fazach</i>	I_A	I_B	I_C	I_0	U_A	U_B	U_C	P_A	P_B	P_C
		[A]				[V]			[W]		
1	R_A, R_B, R_C										
2	X_A, X_B, X_C										
3	$R_{(A,B,C)}$ i $X_{(A,B,C)}$										

Tabela 1.4.

<i>Lp.:</i>	<i>Załączone człony odbiornika symetrycznego w fazach</i>	S_A	S_B	S_C	Q_A	Q_B	Q_C	$\cos\varphi_A$	$\cos\varphi_B$	$\cos\varphi_C$
		[V·A]				[var]			[-]	
1	R_A, R_B, R_C									
2	X_A, X_B, X_C									
3	$R_{(A,B,C)}$ i $X_{(A,B,C)}$									

Tabela 1.5.

<i>Lp.:</i>	<i>Załączone człony odbiornika niesymetrycznego w fazach</i>	I_A	I_B	I_C	I_0	U_A	U_B	U_C	P_A	P_B	P_C
		[A]				[V]			[W]		
1	R_A, R_B, R_C										
2	X_A, X_B, X_C										
3	$R_{(A,B,C)}$ i $X_{(A,B,C)}$										

Tabela 1.6.

<i>Lp.:</i>	<i>Załączone człony odbiornika niesymetrycznego w fazach</i>	S_A	S_B	S_C	Q_A	Q_B	Q_C	$\cos\varphi_A$	$\cos\varphi_B$	$\cos\varphi_C$
		[V·A]			[var]			[-]		
1	R_A, R_B, R_C									
2	X_A, X_B, X_C									
3	$R_{(A,B,C)}$ i $X_{(A,B,C)}$									

Tabela 1.7.

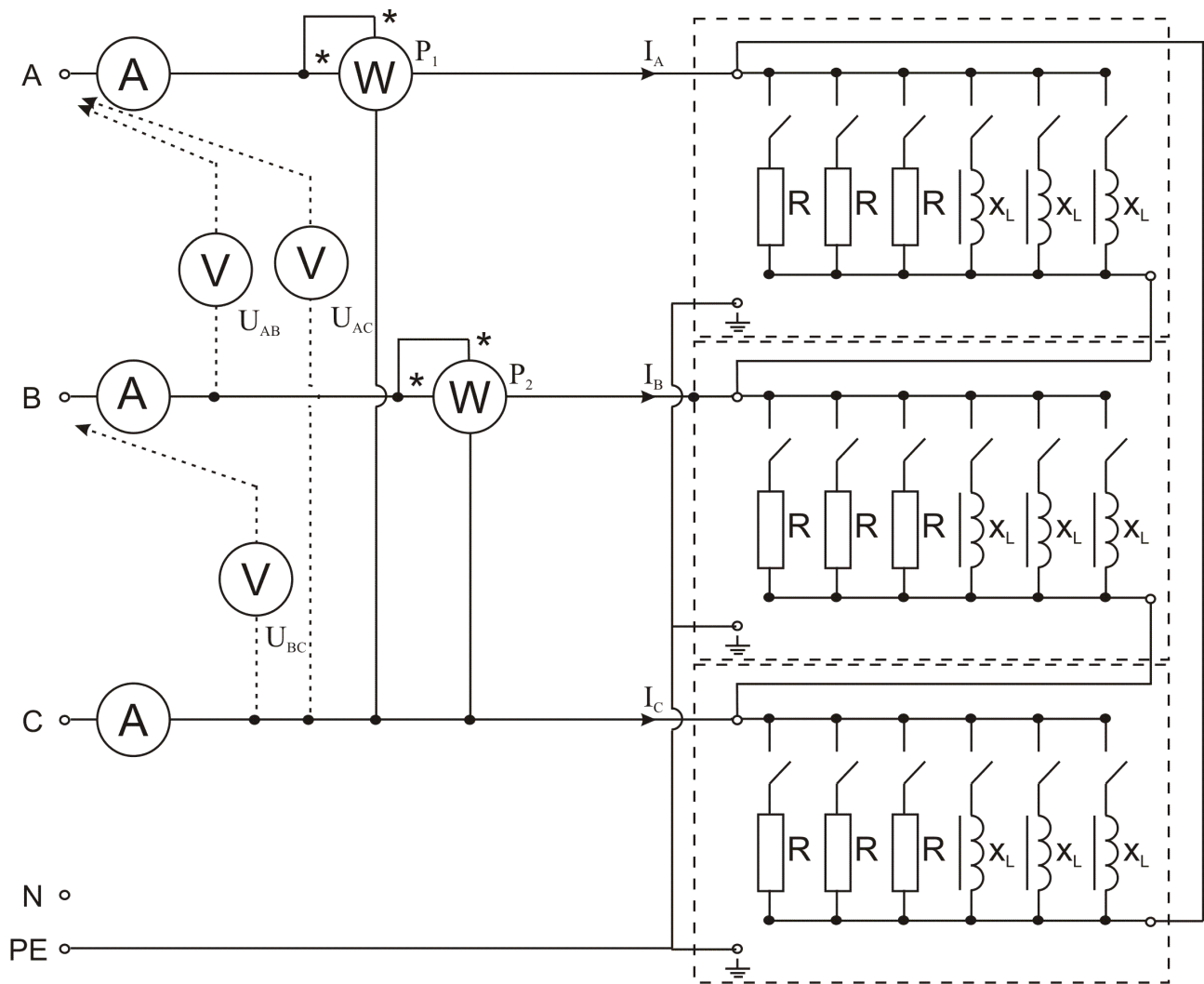
<i>Lp.:</i>	<i>Odbiornik symetryczny</i>			<i>Odbiornik niesymetryczny</i>		
	S	P	Q	S	P	Q
	[V·A]	[W]	[var]	[V·A]	[W]	[var]
1						
2						
3						

Zakładając symetrię zasilania wykonać wykresy wektorowe napięć oraz prądów fazowych, Obok każdego wykresu w sposób graficzny przedstawić sumę wektorów prądów.

1.4.3 Pomiary mocy czynnej odbiornika połączonego w trójkąt.

Pomiary mocy czynnej odbiornika połączonego w trójkąt wykonuje się w układzie (schemat przedstawiony na rys.8). Podobny układ pomiarowy stosujemy gdy mierzymy odbiornik połączony w gwiazdę bez wyprowadzonego punktu zerowego. Ćwiczenie wykonujemy dla kilku konfiguracji zarówno odbiornika symetrycznego jak i odbiornika niesymetrycznego. Konfigurację obciążenia zmieniamy tak, aby któryś z pomiarów dotyczył sytuacji, gdy wskazanie jednego z watomierzy jest ujemne. Z uzyskanych wskazań amperomierzy i woltomierzy można wyznaczyć moc pozorną odbiornika z zależności (1.17) ale tylko w razie symetrii układu. [2]

Wyniki pomiarów i obliczeń przedstawić w tabeli 1.8.



Rys. 8. Pomiary mocy odbiornika -trójfazowego zasilanego trójprzewodowo

Tabela 1.8.

<i>Lp.:</i>	<i>Załączone człony odbiornika symetrycznego w fazach</i>	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P_A	P_B	P
		[A]			[V]			[W]		
1	R_A, R_B, R_C									
2	X_A, X_B, X_C									
3	$R_{(A,B,C)}$ i $X_{(A,B,C)}$									

Tabela 1.9.

<i>Lp.:</i>	<i>Załączone człony odbiornika niesymetrycznego w fazach</i>	<i>I_A</i>	<i>I_B</i>	<i>I_C</i>	<i>U_{AB}</i>	<i>U_{BC}</i>	<i>U_{CA}</i>	<i>P_A</i>	<i>P_B</i>	<i>P</i>
		[A]			[V]			[W]		
1	R _A , R _B , R _C									
2	X _A , X _B , X _C									
3	R _(A,B,C) i X _(A,B,C)									