

Dr inż. Marek Głogowski

4. Pomiar mocy prądu przemiennego

Program ćwiczenia:

- Pomiar mocy czynnej prądu przemiennego jednym watomierzem.
- Pomiar mocy czynnej prądu przemiennego w układzie *Arona*.
- Pomiar mocy biernej prądu przemiennego odbiornika trójfazowego.

Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest poznanie metod pomiaru mocy czynnej, biernej i pozornej prądu przemiennego oraz zasad doboru układu pomiarowego w zależności od warunków zasilania i obciążenia.

Uwaga! Przed przystąpieniem do ćwiczenia proszę zapoznać się z zasadą działania watomierza ferrodynamicznego oraz z dodatkiem pt. "Procedura wyznaczania niepewności pomiarowych".

Wprowadzenie:

Do przesyłania energii na skalę przemysłową wykorzystuje się głównie układy trójfazowe. W celu zapewnienia poprawnej pracy sieci wymagana jest znajomość i kontrola podstawowych parametrów elektrycznych torów przesyłowych: prądów przewodowych I , napięć przewodowych U_p i fazowych U_f , mocy czynnej P , biernej Q , pozornej S oraz współczynnika mocy $\cos\varphi$.

Moc całkowita pobierana przez odbiornik trójfazowy jest równa sumie mocy pobieranych z poszczególnych faz. W obwodach o sinusoidalnym przebiegu napięcia i prądu moce fazowe są równe:

- czynna $P_f = U_f \cdot I \cdot \cos\varphi$ [W],
- bierna $Q_f = U_f \cdot I \cdot \sin\varphi$ [VAr],
- pozorna $S_f = U_f \cdot I$ [VA],
- współczynnik mocy $\cos\varphi = P_f / S_f$.

Ze względów energetycznych najważniejszym parametrem jest moc czynna, informująca o stanie obciążenia układu.

Wskazane jest, aby moc pobierana przez układ pomiarowy była możliwie małą częścią mocy przesyłanej. Gdy straty mocy układu pomiarowego wpływają na dokładność pomiarów, należy w wynikach pomiarów uwzględnić odpowiednie poprawki.

Pomiary mocy odznaczają się dużą różnorodnością metod i układów pomiarowych. Właściwy wybór układu jest uwarunkowany rodzajem sieci systemu trójfazowego (trój- lub czteroprzewodowy), stopniem symetrii obciążenia faz, wartościami napięć i prądów w kontrolowanym obwodzie.

1. Pomiar mocy czynnej.

Moc czynna pobierana przez odbiornik trójfazowy jest równa sumie mocy czynnych pobieranych przez poszczególne fazy odbiornika A, B, C:

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c$$

gdzie:

$U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c$ – skuteczne wartości napięć i prądów fazowych,

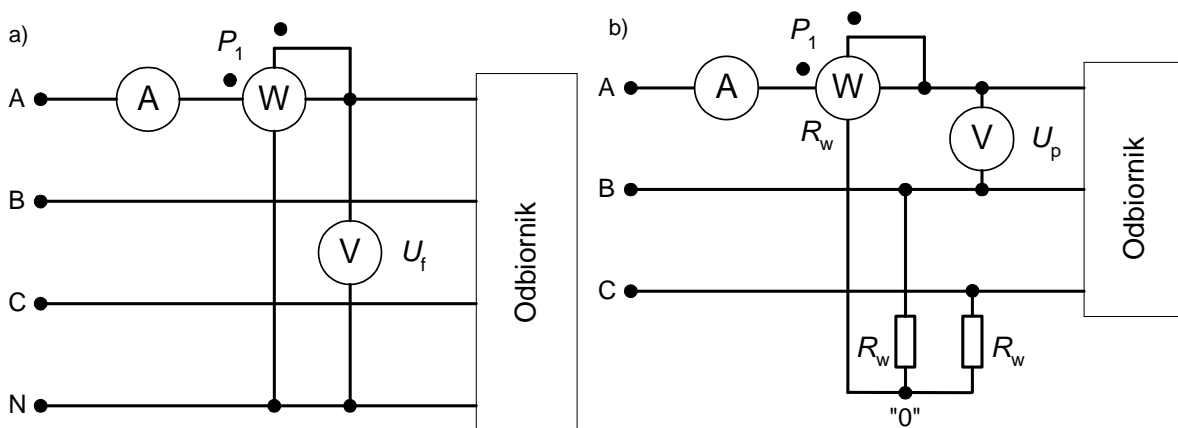
$\cos \varphi_a, \cos \varphi_b, \cos \varphi_c$ – współczynniki mocy kolejnych faz.

Do pomiaru mocy czynnej w układzie czteroprzewodowym potrzebne są trzy watomierze. Każdy z watomierzy mierzy moc pobieraną przez jedną z faz odbiornika. Jeżeli źródło i odbiornik są symetryczne, wskazania poszczególnych watomierzy są jednakowe, można więc ograniczyć się do pomiaru mocy w jednej tylko fazie i pomnożyć zmierzoną wartość przez 3.

$$P = 3P_f = 3U_f I \cos \varphi = \sqrt{3}U_p I \cos \varphi$$

W sieci czteroprzewodowej stosuje się układ pomiarowy, jak na rys.1a, a dla sieci trójprzewodowej układ z rys. 1.b.

W obwodzie trójprzewodowym, z niedostępnym punktem neutralnym, tworzy się sztuczny punkt neutralny przez połączenie w symetryczną gwiazdę obwodu napięciowego watomierza i dwóch oporników pomocniczych o rezystancjach równych rezystancji obwodu napięciowego watomierza R_w . W obu układach obwód napięciowy watomierza jest włączony na napięcie fazowe. Podczas łączenia obwodu pomiarowego należy zwrócić uwagę na początki obwodów prądowego i napięciowego watomierza – na rys.1. **oznaczone są kropką.**



Rys. 1. Układ bezpośredni do pomiaru mocy czynnej symetrycznego odbiornika trójfazowego jednym watomierzem: a) w sieci czteroprzewodowej (z przewodem neutralnym N), b) w sieci trójprzewodowej.

Wyniki pomiarów odbiornika oblicza się z zależności:

a) dla układu z rys. 1.a:

– moc czynna:

$$P = 3P_1 = 3c_w \alpha$$

– moc pozorna:

$$S = 3U_f I$$

– współczynnik mocy:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{3U_f I}$$

b) dla układu z rys. 1.b:

– moc czynna:

– moc pozorna:

– współczynnik mocy:

$$S = 3 \frac{U_p}{\sqrt{3}} I = \sqrt{3} U_p I$$

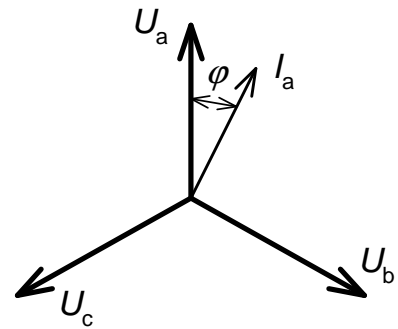
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} U_p I}$$

gdzie:

c_w ¹⁾, α – stała watomierza i jego wychylenie,

U_f , U_p – napięcie fazowe i przewodowe (międzyfazowe),

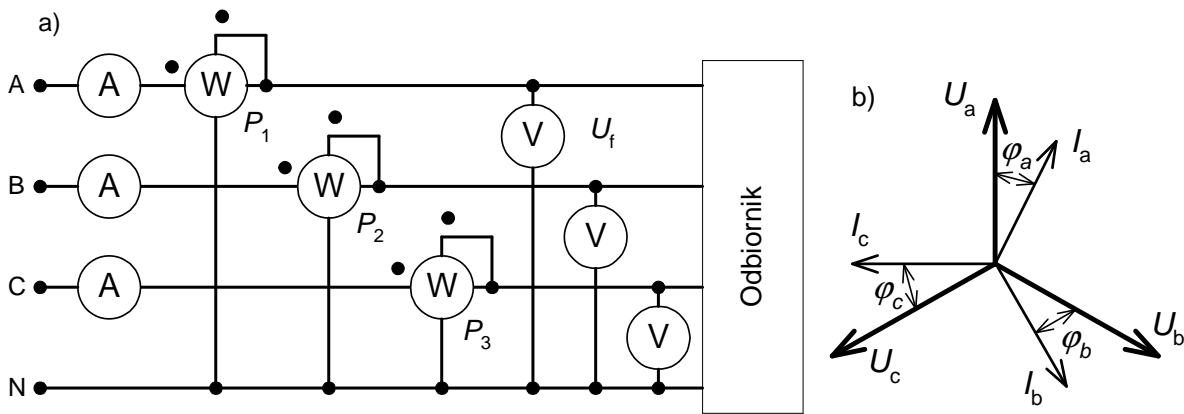
I – prąd fazowy odbiornika.



Rys. 1c. Wykres wektorowy

Do wyznaczania mocy odbiornika trójfazowego niesymetrycznego konieczny jest pomiar mocy we wszystkich fazach. W sieci czteroprzewodowej pomiar wykonuje się trzema watomierzami jak na rys 2.

¹⁾ stała watomierza, $c_w = (\text{zakres pomiarowy napięcia} \cdot \text{zakres pomiarowy prądu}) / \text{liczba działek}$



Rys. 2. Układ bezpośredni do pomiaru mocy czynnej niesymetrycznego odbiornika trójfazowego w sieci czteroprzewodowej: a) układ pomiarowy, b) wykres wektorowy.

Moc czynna odbiornika jest równa sumie algebraicznej mocy wskazywanych przez watomierze. W przypadku watomierzy o jednakowych stałych c_w moc wynosi:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = c_w (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$$

Względny błąd pomiaru mocy wynikający z niedokładności (klas) watomierzy wyraża wzór:

$$\delta P = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3}{P} = \frac{P_{n1} kl_1 + P_{n2} kl_2 + P_{n3} kl_3}{P_1 + P_2 + P_3}$$

lub w przypadku jednakowych watomierzy o równych klasach $kl_1 = kl_2 = kl_3 = kl$ i zakresach znamionowych $P_{n1} = P_{n2} = P_{n3} = P_n$:

$$\delta P = 3kl \frac{P_n}{P_1 + P_2 + P_3} = 3kl \frac{\alpha_m}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}$$

W sieci trójprzewodowej pomiar mocy czynnej wykonuje się w układzie dwóch watomierzy, tzw. układzie *Arona*. Jest to układ stosowany najczęściej w praktyce, który umożliwia poprawny pomiar mocy czynnej przy symetrii zasilania oraz odbioru. Zasada pracy układu wykorzystuje fakt, że suma wartości chwilowych prądów fazowych w sieci trójprzewodowej jest równa zero:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

Ponieważ wartość chwilowa mocy czynnej odbiornika jest równa sumie wartości chwilowych mocy fazowych:

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$$

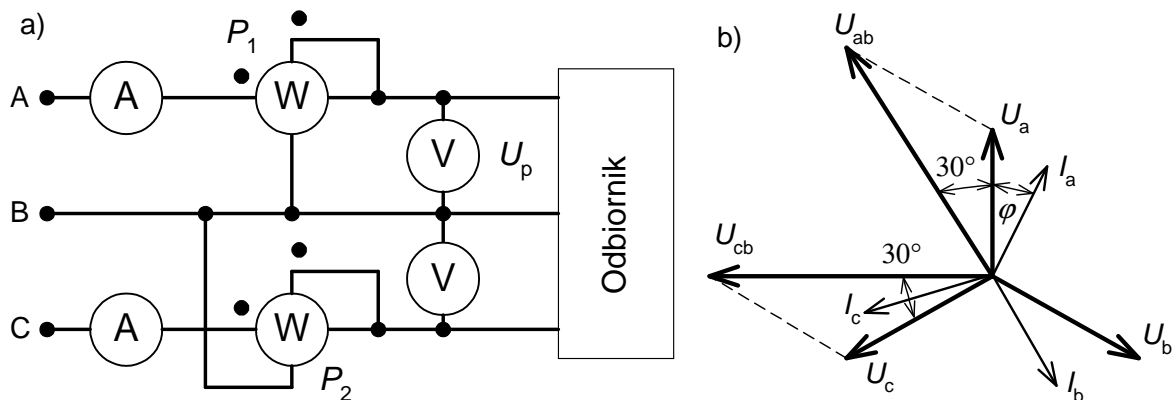
więc po uwzględnieniu zależności $i_b = -i_a - i_c$ otrzymuje się moc chwilową:

$$p = (u_a - u_b) i_a + (u_c - u_b) i_c = u_{ab} i_a + u_{cb} i_c$$

Stąd moc czynna odbiornika wynosi:

$$P = U_{ab} I_a \cos \varphi_{ab} + U_{cb} I_c \cos \varphi_{cb} \quad (*)$$

Układ pomiaru mocy czynnej dwoma watomierzami, wykonujący pomiar zgodnie z tą zależnością przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Układ bezpośredni do pomiaru mocy czynnej odbiornika dwoma watomierzami (układ Arona) w sieci trójprzewodowej: a) układ pomiarowy, b) wykres wektorowy dla obwodu symetrycznego.

Moc czynna odbiornika jest równa sumie mocy wskazywanych przez watomierze:

$$P = P_1 + P_2 = c_w (\alpha_1 + \alpha_2)$$

W przypadku asymetrii systemu trójfazowego nie oblicza się współczynnika mocy odbiornika $\cos \varphi$, gdyż kąty przesunięć fazowych prądów i napięć kolejnych faz są różne. W przypadku natomiast symetrii zasilania i obciążenia można z różnicy wskazań watomierzy oraz zależności (***) i (***) wyznaczyć moc bierną:

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2) = \sqrt{3}U_p I [\cos(30^\circ + \varphi) - \cos(30^\circ - \varphi)] = \sqrt{3}U_p I \sin \varphi$$

Stąd moc pozorna S oraz współczynnik mocy odbiornika $\cos \varphi$:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{i} \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Względny błąd pomiaru mocy wynikający z klas watomierzy wyraża wzór:

$$\delta P = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{P} = \frac{P_{n1}kl_1 + P_{n2}kl_2}{P_1 + P_2}$$

lub dla watomierzy o równych klasach $kl_1 = kl_2 = kl$ i takich samych zakresach znamionowych $P_{n1} = P_{n2} = P_n$:

$$\delta P = 2kl \frac{P_n}{P_1 + P_2} = 2kl \frac{\alpha_m}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

W symetrycznym obwodzie pomiarowym, tj. gdy $U_{ab} = U_{cb} = U_p$ oraz $I_a = I_b = I$ na podstawie zależności (*) i wykresu wektorowego z rys. 3.b, otrzymuje się, że moce czynne mierzone przez watomierze w układzie *Arona* wynoszą:

$$P_1 = U_p I \cos(30^\circ + \varphi) \quad \text{i} \quad P_2 = U_p I \cos(30^\circ - \varphi) \quad (**)$$

Wynika z tego, że w zależności od charakteru obciążenia wskazania watomierzy w układzie *Arona* mogą być zarówno dodatnie, jak i ujemne. Gdy np. współczynnik mocy odbiornika $\cos\varphi = 1$, czyli jeśli $\varphi = 0$, wówczas wskazania obu watomierzy są jednakowe, dla $\cos\varphi = 0.5$, watomierz P_1 wskaże zero, a dla $\cos\varphi < 0.5$, jego wskazania będą ujemne. W celu dokonania odczytu należy zmienić kierunek prądu w cewce napięciowej watomierza; pamiętając, że przy obliczaniu mocy odbiornika P uwzględnia się odczytaną moc ze znakiem minus. Suma wskazań obu watomierzy jest jednak zawsze nieujemna, ale liczyć się należy z dużym błędem pomiaru mocy, szczególnie wówczas, gdy wskazania obu watomierzy mają przybliżone wartości różniące się znakiem.

Tabela dla pomiarów przy użyciu jednego watomierza – moc czynna

Lp.	U	I	P ₁			P	S	Q	cosφ	Obc.
			α	c _w	W					
	V	A	dz	W/dz		W	VA	VAr	–	–
1										RL
2										RLC
3										C

Tabela dla pomiarów przy użyciu jednego watomierza – moc bierna

Lp.	U	I	Q _w			Q	S	P	cosφ	Obc.
			α	c _w	VAr					
	V	A	dz	VAr/dz		VAr	VA	W	–	–
1										RL
2										RLC
3										C

Tabela dla pomiarów przy użyciu dwóch watomierzy

Lp.	U_1	U_2	I_1	I_2	P_1			P_2			P	Q	S	$\cos\varphi$	δP	Obc.
					α	c_w	W	α	c_w	W						
	V	V	A	A	dz	W/dz		dz	W/dz		W	VAr	VA	–	%	–
1																RL
2																RLC
3																C

2. Pomiar mocy biernej.

Moc bierna w sieci trójfazowej o napięciu sinusoidalnym jest sumą mocy biernych trzech faz:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = U_a I_a \sin \varphi_a + U_b I_b \sin \varphi_b + U_c I_c \sin \varphi_c$$

Przy pełnej symetrii zasilania i obciążenia faz moc bierna określa wzór:

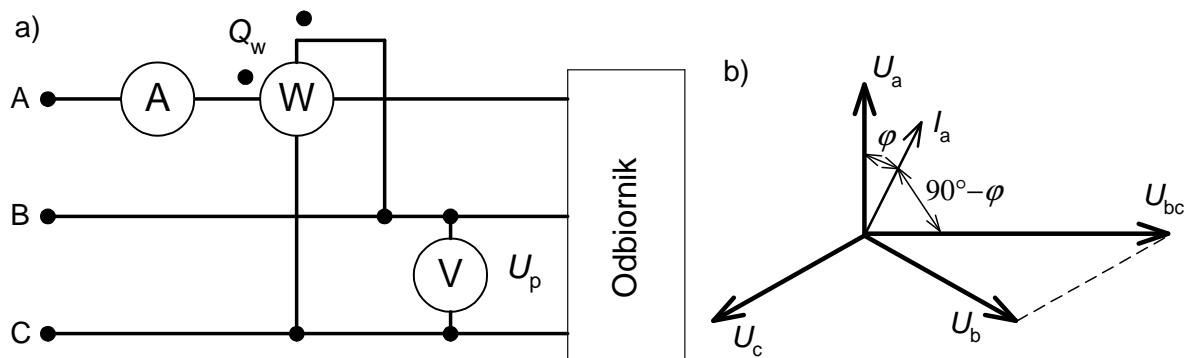
$$Q = 3Q_f = 3U_f I \sin \varphi = \sqrt{3}U_p I \sin \varphi \quad (***)$$

Pomiar mocy biernej watomierzami w układzie trójfazowym jest poprawny tylko, wtedy gdy zachowana jest symetria napięć zasilających i kolejność faz. Zasady pomiaru są takie same jak przy pomiarze mocy czynnej. Aby watomierz mierzył moc bierną, musi mieć obwód napięciowy włączony na napięcie opóźnione w fazie o 90° względem napięcia, jakie było doprowadzone do watomierza podczas pomiaru mocy czynnej, przy niezmięnionej wartości skutecznej tego napięcia. W systemach trójfazowych o zachowanej symetrii napięć, przesunięcia fazowe o kąt 90° występują między napięciami fazowymi a przewodowymi.

Dla symetrycznego obciążenia sieci, pomiar mocy biernej odbiornika przeprowadza się w układzie jednego watomierza przez wyznaczenie mocy jednej fazy i pomnożenie uzyskanego wyniku przez trzy. Zasadę pomiaru przedstawiono na rys. 4.

Watomierz, którego cewka napięciowa włączona jest na napięcie przewodowe wskazuje moc bierną:

$$Q_w = U_{bc} I_a \cos(90^\circ - \varphi) = U_{bc} I_a \sin \varphi$$



Rys. 4. Układ bezpośredni do pomiaru mocy biernej symetrycznego odbiornika trójfazowego jednym watomierzem: a) układ pomiarowy, b) wykres wektorowy.

Ponieważ napięcie przewodowe U_{bc} jest $\sqrt{3}$ razy większe od napięcia fazowego, to aby spełnić warunek o niezmienności wartości skutecznej napięcia, wskazanie watomierza należy podzielić przez $\sqrt{3}$.

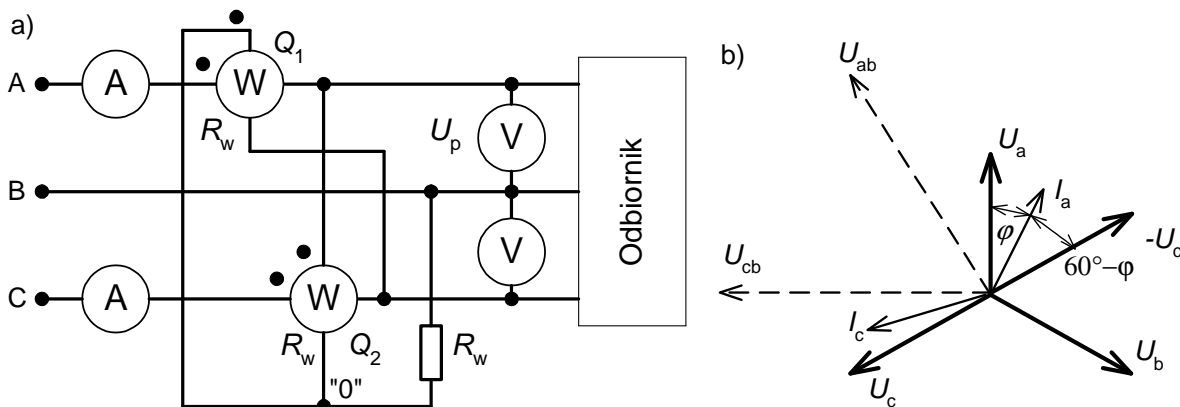
Stąd moc bierna fazy:

$$Q_f = \frac{Q_w}{\sqrt{3}}$$

i moc bierna odbiornika symetrycznego:

$$Q = 3Q_f = 3 \frac{Q_w}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}Q_w$$

Podstawowym układem do pomiaru mocy biernej w sieciach trójprzewodowych obciążonych niesymetrycznie jest układ z dwoma watomierzami przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Układ bezpośredni do pomiaru mocy biernej odbiornika dwoma watomierzami w sieci trójprzewodowej: a) układ pomiarowy, b) wykres wektorowy.

Cewki napięciowe obu watomierzy wraz z opornikiem pomocniczym o rezystancji R_w są połączone w symetryczną gwiazdę – tworzą sztuczny punkt zerowy. Dzięki temu, cewki napięciowe watomierzy zasilane są napięciami fazowymi – U_c i U_a , które są przesunięte wstecz o 90° względem napięć przewodowych U_{ab} i U_{cb} podawanych na watomierze w układzie Arona podczas pomiaru mocy czynnej. Na watomierzach występują więc napięcia $\sqrt{3}$ razy mniejsze – fazowe, a nie przewodowe. Aby zachować warunek niezmienności wartości skutecznej napięcia, wskazania watomierzy należy pomnożyć przez $\sqrt{3}$. Stąd moc bierna odbiornika:

$$Q = \sqrt{3}(Q_1 + Q_2)$$

Tabele pomiarowe podobne jak przy pomiarze mocy czynnej.

Opracowanie sprawozdania:

Sprawozdanie z wykonanego ćwiczenia powinno zawierać:

- protokół z pomiarów,
- analizę porównawczą układów pomiaru mocy czynnej z jednym i dwoma watomierzami,
- wyniki pomiarów i obliczeń ujęte w tabelach pomiarowych,
- uwagi i wnioski z uwzględnieniem rachunku niepewności.

Literatura:

- Bartoszewski J., Koczela D., Ćwiczenia laboratoryjne z miernictwa elektrycznego, Wydawnictwo PWr, Wrocław 1998.
- Elektrotechnika. Ćwiczenia laboratoryjne: praca zbiorowa, Wydawnictwo PWr, Wrocław 1979.
- Kurdziel R., Podstawy elektrotechniki, WNT, Warszawa 1972.

ver 06/2012