

LABORATORIUM ELEKTROTECHNIKI

**Zbiór instrukcji laboratoryjnych dla studentów wydziałów
nieelektrycznych Akademii Morskiej w Gdyni**

CZ. II

POMIARY W OBWODACH PRĄDU ZMIENNEGO

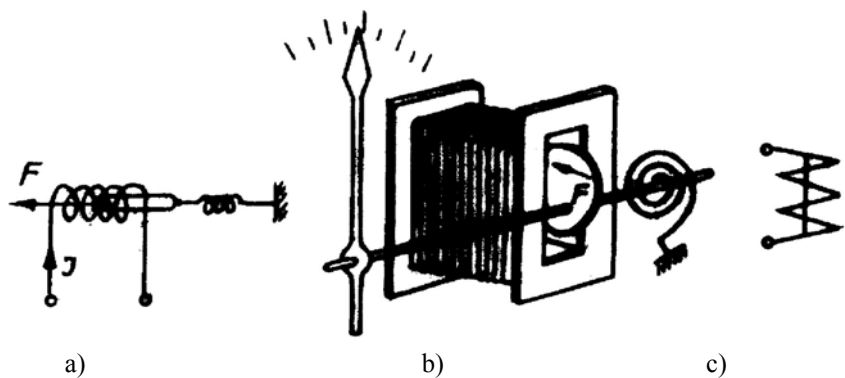
G d y n i a 2 0 0 3

. Wprowadzenie Teoretyczne

1.1. Przyrządy elektromagnetyczne.

Do pomiarów natężenia i napięcia prądu zmiennego służą **przyrządy elektromagnetyczne**. Najprostszym (historycznie najstarszym) rozwiązaniem przyrządu elektromagnetycznego jest przyrząd zbudowany jako cewka z rdzeniem z miękkiego materiału ferromagnetycznego (rys. 1.1.1a.). Gdy przez cewkę przepływa prąd, rdzeń jest wciągany do środka (na zasadzie elektromagnesu).

Budowę jednej ze stosowanych współcześnie odmian przyrządów elektromagnetycznych pokazano na rysunku 1.1.1b.



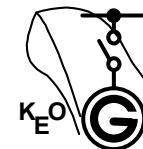
Rys. 1.1.1. Przyrząd elektromagnetyczny:

- a) zasada działania,
- b) budowa (jedna z odmian),
- c) symbol

W płaskiej szczelinie elektromagnesu umieszczona jest okrągła blaszka z materiału ferromagnetycznego zamocowana mimośrodowo. Gdy przez cewkę elektromagnesu przepływa prąd blaszka jest wciągana do szczeliny, co powoduje obrót osi, do której przymocowana jest wskazówka. Moment zwracający pochodzi od spiralnej sprężynki. Wychylenie wskazówki **nie jest** wprost proporcjonalne do natężenia prądu, skala **nie jest** więc równomierna.

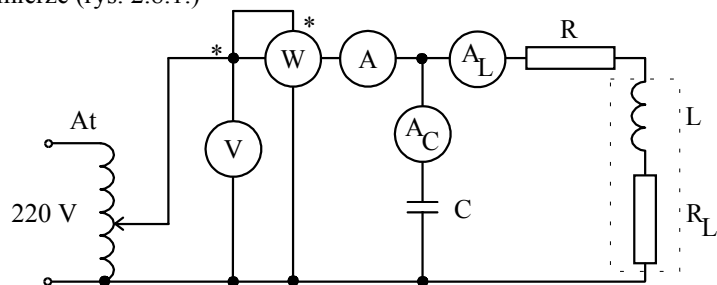
Wychylenie wskazówki nie jest zależne od kierunku przepływu prądu. Blaszka wciągana jest tak przy przepływie prądu zmiennego jak i stałego. Dlatego też przyrządami elektromagnetycznymi można mierzyć zarówno prądy stałe jak i zmiennie. Zwykle przyrząd wycechowany jest w wartościach skutecznych prądu zmiennego. Jeżeli skala jest ważna także dla prądu stałego, umieszczany jest na niej odpowiedni znak.

Przyrządy elektromagnetyczne budowane są jako amperomierze i jako woltomierze.



2.3. Ćwiczenie 8. Kompensacja mocy bierniej.

Zmodyfikuj układ z ćwiczenia 7. w ten sposób, że równolegle do zacisków odbiornika przyłącz kondensator nastawny (C). Dołącz również dwa dodatkowe amperomierze (rys. 2.8.1.)



Rys. 2.3.1.

Dla napięcia wskazanego przez prowadzącego ćwiczenie przeprowadź pomiary prądów i mocy czynnej przy różnych wartościach pojemności (w takim zakresie zmian pojemności by obejmował on minimum prądu - tj. punkt całkowitej kompensacji mocy bierniej).

TABELKA V

Lp	C	P	I	IC	IL
-	μF	W	A	A	A

Sporządzić wykres $I = f(C)$. Znaleźć pojemność odpowiadającą minimum prądu.

Wykorzystując dane z ćwiczenia 7. (tj. dla $C = 0$) obliczyć moc bierną pobieraną przez cewkę przy wskazanym napięciu. Na tej podstawie wyznaczyć pojemność kondensatora potrzebną do całkowitej kompensacji tej mocy. Porównać otrzymany wynik z wynikiem uzyskanym z pomiarów.

Dla $C = 0$ i dla takiej wartości C, przy której prąd całkowity zasilający układ (I) osiąga minimum sporządzić wykres wskazowy prądów i napięć.

Przeprowadzić dyskusję wyników.

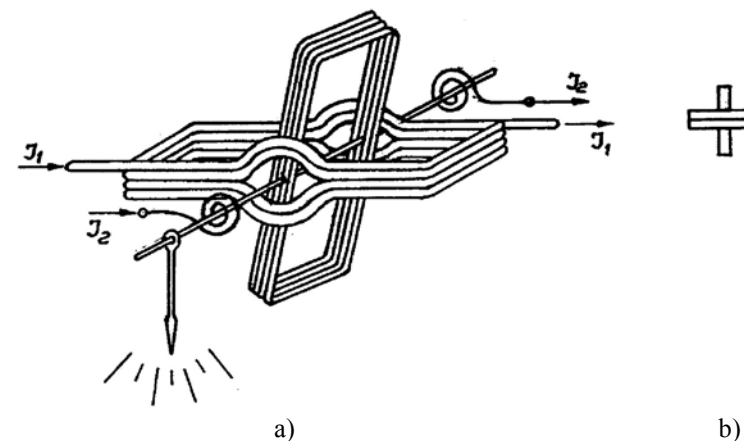
Amperomierze elektromagnetyczne mają cewkę o małej rezystancji, nawiniętą drutem o dużym przekroju i o niewielkiej ilości zwojów. Wielozakresowość realizowana jest poprzez stosowanie odczepów (w zależności od wymaganego zakresu pomiarowego prąd płynie przez odpowiednią ilość zwojów cewki). Nie stosuje się boczników.

Do rozszerzania zakresu pomiarowego amperomierzy elektromagnetycznych używa się specjalnych transformatorów pomiarowych zwanych **przekładnikami prądowymi**.

Woltomierze elektromagnetyczne mają cewki o dużej liczbie zwojów, nawinięte cienkim drutem. W szereg włączany bywa rezystor (posobnik). Służy on do ograniczania prądu płynącego przez przyrząd i do rozszerzania zakresu pomiarowego. Wielozakresowość realizowana bywa także przy wykorzystaniu sekcjonowania cewki ustroju pomiarowego. Przy napięciach wyższych od 1,5 kV do rozszerzania zakresów pomiarowych stosuje się **przekładniki** (transformatory pomiarowe) **napięciowe**.

1.2. Watomierze elektrodynamiczne i ferrodynamiczne.

Zasada działania **przyrządów elektrodynamicznych** opiera się na siłowym oddziaływaniu pola magnetycznego na przewodnik z prądem, przy czym pole jest wytwarzane przy pomocy cewki przez którą przepływa prąd. Tak więc siła działająca na przewodnik z prądem jest proporcjonalna zarówno do prądu płynącego przez przewodnik (w praktyce przez ruchomą ceweczkę) jak i do wytwarzającego pole prądu płynącego w cewce.



Rys. 1.2.1 Przyrząd elektrodynamiczny:

a) budowa,
b) symbol

Budowa ustroju pomiarowego przyrządu elektrodynamicznego pokazana jest na rysunku 1.2.1a. Składa się on z dwóch cewek: nieruchomej (na rysunku płynie przez nią prąd I_1) oraz ruchomej (z prądem I_2). Siły elektrodynamiczne działające na boki cewek powodują przyciąganie się tych boków, w których prądy płyną w zgodnych kierunkach i odpychanie się tych boków, w których kierunki prądów są przeciwnie.

Powstaje moment proporcjonalny do iloczynu wartości skutecznych prądów płynących w obu cewkach i do kosinusa kąta ich wzajemnego przesunięcia fazowego. Moment zwracający dają spiralne sprężynki służące jednocześnie do doprowadzania prądu do cewki ruchomej.

Jeżeli przez obydwie cewki płynie ten sam prąd wychylenie wskazówki jest proporcjonalne do kwadratu jego wartości skutecznej. Jednak przyrządy elektrodynamiczne są wykorzystywane przede wszystkim do budowy **watomierzy**.

W **watomierzu elektrodynamicznym** nieruchomą cewkę (tzw. cewkę prądową) łączy się w obwód pomiarowy szeregowo: płynie przez nią taki sam prąd jaki występuje w obwodzie. Natomiast cewka ruchoma (tzw. cewka napięciowa) łączy się równolegle, tak by przyłożone do niej napięcie było takie samo jak napięcie przyłożone do obwodu: zatem przez cewkę tę płynie prąd proporcjonalny do napięcia.

Tak więc wychylenie wskazówki można opisać zależnością:

$$\alpha = C_W \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1.2.1)$$

gdzie:

α - wychylenie wskazówki w działkach;

C_W - współczynnik proporcjonalności zwany stałą watomierza;

φ - kąt przesunięcia fazowego pomiędzy U i I .

Stałą watomierza C_W oblicza się dzieląc iloczyn znamionowych (zakresowych) wartości U_N , I_N i $\cos \varphi_N$ przez znamionowe (zakresowe) wychylenie α_N (w działkach):

$$C_W = \frac{U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N}{\alpha_N} \quad (1.2.2)$$

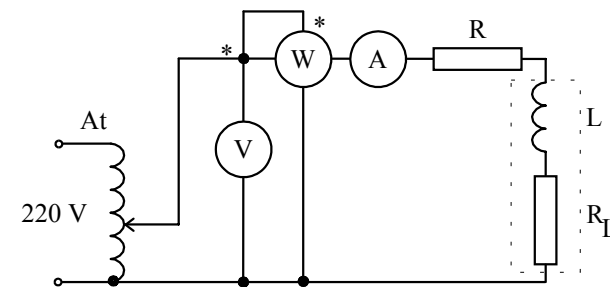
Zazwyczaj watomierze mają przełączalne zakresy prądowe i napięciowe. Znamionowe wartości U_N i I_N podane są na przyrządzie (i nastawialne), natomiast $\cos \varphi_N$, dla watomierzy normalnej budowy zawsze ma wartość jeden i informacja ta nie jest wtedy podawana.

Zakresy U_N i I_N mogą być przekraczane (inaczej niż dla woltomierzy i amperomierzy gdzie przekroczenie zakresu równoznaczne jest z wychyleniem się wskazówki poza skalę). Dane na ten temat znajdują się na skali watomierza. Najczęściej zakres prądowy może być przekraczany o 30% (do $1.3 \cdot I_N$), zaś zakres napięciowy o 50 % (do $1.5 \cdot U_N$).

2.2. Ćwiczenie 7.

Pomiary parametrów obwodu z dławikiem.

Zestaw układ wg schematu z rysunku 2.2.1. Odbiornikiem są połączone ze sobą szeregowo opornik laboratoryjny (nastawiony na wartość wskazaną przez prowadzącego ćwiczenie) oraz dławik. Regulowane napięcie zasilające dostarczane jest przez autotransformator (At).



Rys. 2.2.1.

Zmieniając napięcie od zera do wartości wskazanej przez prowadzącego ćwiczenie mierz moc czynną, prąd i napięcie. Wyniki wpisuj do tabelki IV. Wskazania watomierza notuj w działkach; notować też każdorazowo stałą watomierza obliczoną wg wzoru 1.2.2..

Starannie dobieraj zakresy przyrządów pomiarowych.

WAŻNE: Zwracać uwagę na to by nie przekraczać zakresów prądowych i napięciowych watomierza ponad wartości dopuszczalne określone na skali przyrządu. (por. pkt. 1.2) !

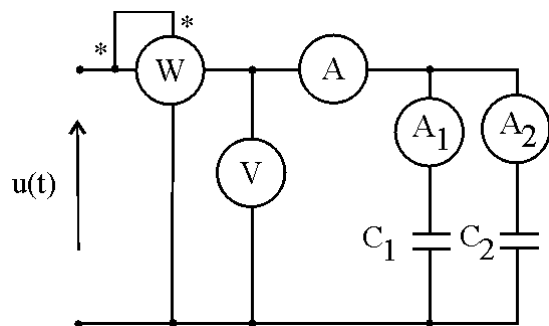
Tabela IV

Lp	napięcie			natężenie			moc		
	CV	α	U	CA	α	I	CW	α	P
	V/dz	dz	V	A/dz	dz	A	W/dz	dz	W

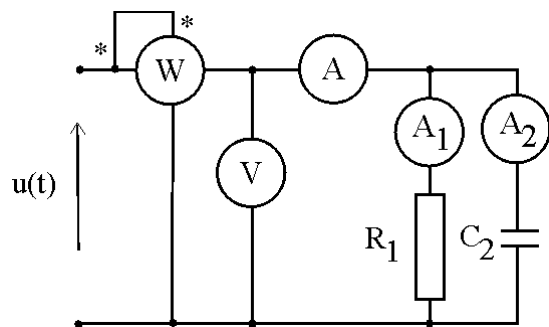
Dla pomierzonych wartości oblicz współczynnik mocy $\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$ oraz

kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem $\varphi = \arccos \frac{P}{U \cdot I}$. Wykreśl charakterystyki $U = f(I)$ oraz $\cos \varphi = f(I)$ i $\varphi = f(I)$.

Wyjaśnij ich przebieg.



Rys. 2.1.6. Układ pomiarowy nr. 6. do ćwiczenia 5-6.



Rys. 2.1.7. Układ pomiarowy nr. 7. do ćwiczenia 5-6.

a) Uzupełnij części „obliczeniowe” tabelki.

Przeprowadź porównanie z wartościami odczytanymi z nastaw opornika i kondensatora. Wyciągnij wnioski.

b) Sprawdź czy dla szeregowego połączenia rezystorów i kondensatorów oraz kondensatora i rezystora spełnione jest drugie prawo Kirchhoffa.

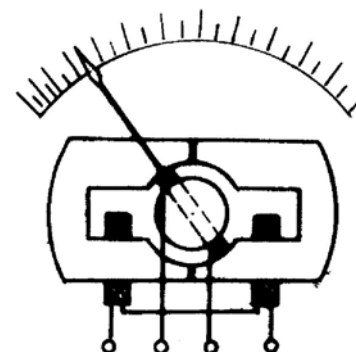
Dla gałęzi z kondensatorem (kondensatorami) wyznacz reaktancje pojemnościowe. Dla każdego przypadku wyznacz impedancje wypadkowe gałęzi. Oblicz rezystancje i pojemności zastępcze.

c) Sprawdź czy dla równoległego połączenia rezystorów i kondensatorów oraz kondensatora i rezystora spełnione jest pierwsze prawo Kirchhoffa.

Dla gałęzi z kondensatorem (kondensatorami) wyznacz reaktancje pojemnościowe. Dla każdego przypadku wyznacz impedancje wypadkowe gałęzi. Oblicz rezystancje i pojemności zastępcze.

Dla wszystkich przypadków sporządź wykresy wskazowe prądów i napięcia (w skali).

Zasada działania **watomierza ferrodynamicznego** jest podobna do opisanej wyżej, tylko dla zwiększenia strumienia magnetycznego cewek, a więc dla zwiększenia momentu napędowego bez powiększania poboru mocy wprowadza się rdzeń żelazny. Zasadę budowy ustroju pomiarowego ferrodynamicznego pokazano na rys. 1.2.2.



a)



b)

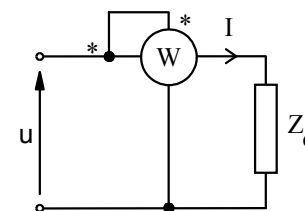
Rys. 1.2.2. Przyrząd ferrodynamiczny:

a) budowa

b) symbol

1.3. Pomiary mocy.

Schemat włączenia watomierza przy pomiarze mocy **prądu jednofazowego** pokazano na rysunku 1.3.1.



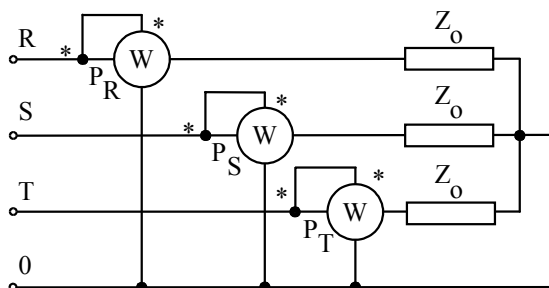
Rys. 1.3.1. Pomiar mocy prądu jednofazowego

Cewka prądowa watomierza (para zacisków oznaczona - na obudowie przyrządu - literą A) włączona jest jak amperomierz, to jest w ten sposób by płynął przez nią prąd płynący przez odbiornik. Cewkę napięciową (para zacisków oznaczona literą V) włącza się tak jak woltomierz, to jest tak, by przyłożone było do niej napięcie panujące na odbiorniku.

Pomiar mocy może się odbywać z poprawnie mierzonym prądem lub z poprawnie mierzonym napięciem. Zaciski do których podłączone są tzw. **początki cewek** oznaczone są gwiazdkami. W przypadku pomiaru mocy z poprawnie mierzonym prądem (jak na rysunku) powinny one być połączone ze sobą po stronie zasilania układu.

Pomiary mocy w układzie **trójfazowym czteroprzewodowym** (tj z dostępnym punktem zerowym) przeprowadza się przy użyciu trzech watomierzy mierzących moc każdej z faz oddzielnie. Moc całego układu jest równa sumie mocy poszczególnych faz:

$$P = P_R + P_S + P_T \quad (1.3.1)$$



Rys. 1.3.2. Pomiar mocy prądu trójfazowego przy pomocy trzech watomierzy

Gdy układ jest **symetryczny** moce poszczególnych faz są jednakowe, a więc:

$$P = P_R = P_S = P_T = P_f$$

Wówczas można mierzyć moc tylko jednej fazy i otrzymać moc układu trójfazowego mnożąc tę moc przez trzy.

$$P = 3 \cdot P_f \quad (1.3.2)$$

Jeżeli odbiornik połączony jest ze źródłem zasilania przy pomocy trzech przewodów, bez przewodu zerowego (**układ trójprzewodowy**), to można zastosować metodę pomiaru wykorzystującą dwa watomierze połączone w tzw. **układ Aarona**. Zasadę pomiaru pokazuje rys. 1.3.3.

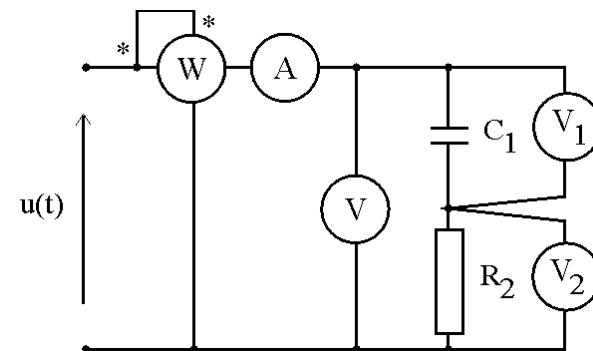
Moc układu trójfazowego równa się sumie wskazań watomierzy:

$$P = P_\alpha + P_\beta = U_{RS} \cdot I_R \cos \alpha + U_{TS} \cdot I_T \cos \beta \quad (1.3.3.)$$

gdzie:

$$\alpha = \langle U_{RS}, I_R \rangle$$

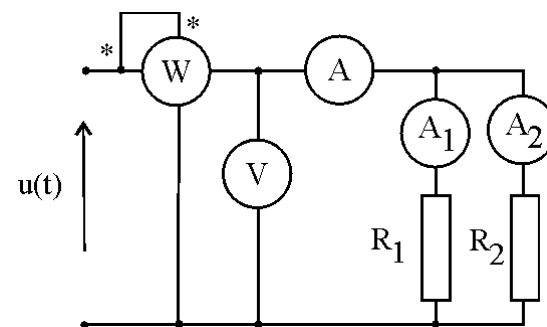
$$\beta = \langle U_{TS}, I_T \rangle$$



Rys. 2.1.4. Układ pomiarowy nr. 4. do ćwiczenia 5-6.

6. Połącz równolegle dwa rezystory (rys. 2.1.5.) i wykonaj czynności z punktu 2. Zwróć uwagę na wartości prądów I_1 , I_2 i I_3 . Wyniki zanotuj w tabeli III.

7. Następnie wykonaj analogiczne pomiary dla równolegle połączonych kondensatorów (rys. 2.1.6.) oraz rezystora i kondensatora (rys. 2.1.7.). Wyniki zanotuj w tabeli III.



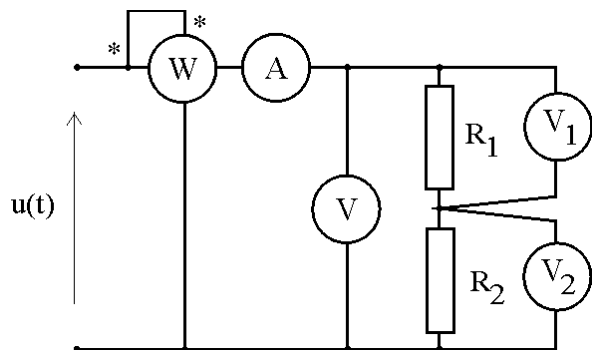
Rys. 2.1.5. Układ pomiarowy nr. 5. do ćwiczenia 5-6.

Tabela III

f	P	U	I	I_1	I_2
Hz	W	V	A	A	A

8. Dla szeregowego (rys. 2.1.3) i równoległego (rys. 2.1.6) połączenia kondensatorów oblicz pojemność zastępczą i porównaj wyniki obliczeń z wynikami pomiarów.

4. Połącz szeregowo dwa rezystory (rys. 2.1.2.) i wykonaj czynności z punktu 2. Zwróć uwagę na wartości napięć U_1 , U_2 i U_3 . Wyniki zanotuj w tabeli II.

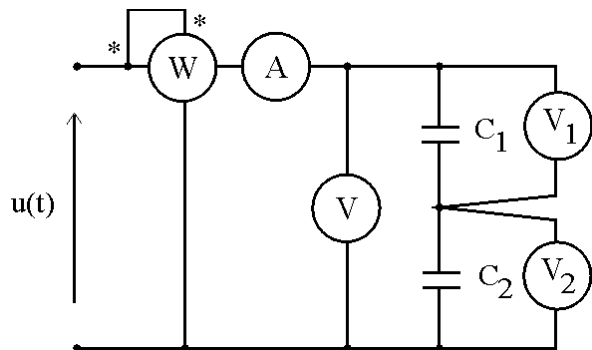


Rys. 2.1.2. Układ pomiarowy nr. 2. do ćwiczenia 5-6.

Tabela II

f	P	I	U	U_1	U_2
Hz	W	A	V	V	V

5. Następnie wykonaj analogiczne pomiary dla szeregowo połączonych kondensatorów (rys. 2.1.3.) oraz rezystora i kondensatora (rys. 2.1.4). Wyniki zanotuj w tabeli II



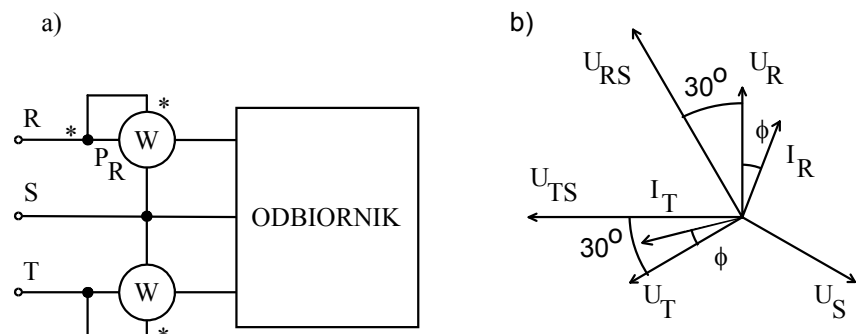
Rys. 2.1.3. Układ pomiarowy nr. 3. do ćwiczenia 5-6.

Pomiar jest poprawny dla dowolnego 3-fazowego układu napięć i prądów. Jeżeli prądy i napięcia są symetryczne jest:

$$P_{\alpha} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ), \quad (1.3.4a)$$

$$P_{\beta} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ), \quad (1.3.4b)$$

$$P = P_{\alpha} + P_{\beta} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1.3.4c)$$



Rys. 1.3.3. Pomiar mocy prądu trójfazowego przy pomocy dwóch watomierzy (układ Arona):

- schemat połączeń,
- wykres wskazowy (dla przypadku symetrycznego)

Gdy prąd jest w fazie z napięciem, co ma miejsce wówczas, gdy odbiornik jest czysto rezystancyjny, kąt $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$), wskazania watomierzy są jednakowe i wynoszą:

$$P_{\alpha} = P_{\beta} = U \cdot I \cdot \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U \cdot I, \quad (1.3.5)$$

Gdy $\varphi \neq 0$ wskazania obu watomierzy są niejednakowe. Szczególnym przypadkiem jest kąt $\varphi = 60^\circ$ ($\cos \varphi = 0.5$). Wówczas:

$$P_{\alpha} = U \cdot I \cdot \cos 90^\circ = 0; \quad P_{\beta} = U \cdot I \cdot \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} U \cdot I; \quad (1.3.6)$$

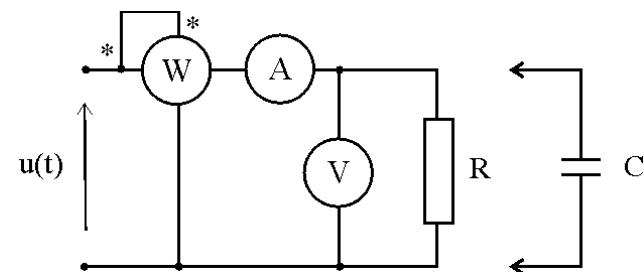
a więc jeden z watomierzy wskazuje zero, a drugi całą moc pobieraną przez odbiornik (równą $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos 60^\circ = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \frac{1}{2}$).

Dla $\varphi > 60^\circ$ ($\cos \varphi < 0.5$) jest $\varphi + 30^\circ > 90^\circ$ i $P_\alpha < 0$, a zatem watomierz z fazy R (na rys. 1.3.3.) ma ujemne wskazania - wychyla się "odwrotnie". Należy wówczas zmienić biegunowość doprowadzeń do zacisków napięciowych. Teraz wskazówka będzie wychylać się we właściwą stronę. Odczytany wynik należy zapisywać ze znakiem ujemnym.

2. Część Pomiarowa

2.1. Ćwiczenie 5-6.

Pomiary w obwodach prądu zmiennego



Rys. 2.1.1. Układ pomiarowy nr. 1. do ćwiczenia 5.

1. Połącz obwód według rys. 2.11.
2. Prowadzący ćwiczenie wskaże oporniki i kondensatory jakie zostaną użyte w ćwiczeniu.
3. Zmieniaj napięcie w zakresie podanym przez prowadzącego ćwiczenia i notuj wartości napięcia, prądu i mocy w obwodzie. Wyniki wpisz w tabeli Ia.
4. Pamiętaj o zanotowaniu w każdym przypadku częstotliwości (pomiar częstotliwości za pomocą częstotliwościomierza wspólnego dla wszystkich grup) oraz rezystancji oporników i pojemności kondensatorów.
5. Zastąp rezystor kondensatorem i powtórz czynności z punktu 2. Wyniki zanotuj w tabeli Ib.

Tabela Ia

Pomiary				Obliczenia
f	U	I	P	R
Hz	V	A	W	Ω

Tabela Ib

Pomiary				Obliczenia		
f	U	I	P	X_C	ωC	C
Hz	V	A	W	Ω	Ω	μF