

Ćwiczenie nr 11

POMIAR MOCY PRĄDU JEDNOFAZOWEGO

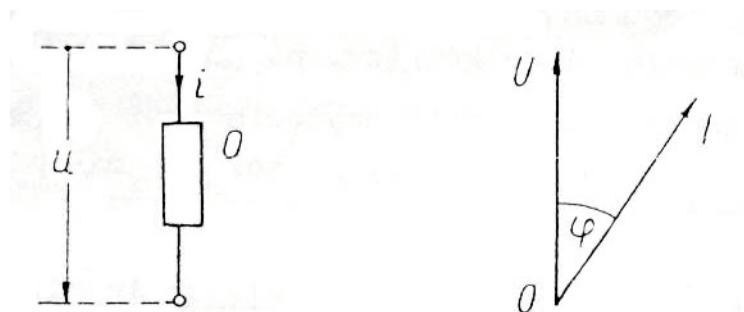
Celem ćwiczenia jest poznanie własności metody pomiaru mocy czynnej, biernej i pozornej za pomocą woltomierza, amperomierza i watomierza elektrodynamicznego, a w szczególności poznanie:

- 1) typowych układów połączeń, stosowanych przy pomiarze mocy,
- 2) wpływu poboru mocy przez przyrządy pomiarowe na dokładność pomiaru,
- 3) stosowanie przekładników przy pomiarze mocy,
- 4) wpływu błędów przekładników na dokładność pomiaru mocy czynnej watomierzem elektrodynamicznym.

Zasada pomiaru

Pomiar mocy odbiornika przy prądzie zmiennym obejmuje wyznaczenie mocy czynnej, biernej i pozornej.

Po przyłożeniu do zacisków odbiornika sinusoidalnie zmiennego napięcia U przez odbiornik popłynie zmienny prąd o natężeniu I , wówczas:



Rys. 1

moc czynna:

$$P=UI\cos\varphi \text{ [W]} \quad (1)$$

moc bierna:

$$Q=UI\sin\varphi \text{ [VAr]} \quad (2)$$

moc pozorna:

$$S=UI \text{ [W]} \quad (3)$$

gdzie:

U - wartość skuteczna napięcia w woltach,

I – wartość skuteczna natężenia prądu w amperach,

φ - kąt fazowy między prądem a napięciem.

Dla prądu jednofazowego, stosownie do zależności (1), (2) i (3), pomiar mocy czynnej wykonuje się za pomocą watomierza mocy czynnej, pomiar mocy pozornej wymaga użycia woltomierza i amperomierza, zaś pomiar mocy biernej może być wykonany za pomocą watomierza mocy biernej lub moc bierna może być obliczona po wyznaczeniu mocy czynnej i pozornej z zależności:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4)$$

Moc odbiornika zależy od szeregu czynników i przed przystąpieniem do pomiaru muszą być ustalone warunki, przy których moc odbiornika ma być wyznaczona. Ze względu na układ połączeń przyrządów pomiarowych należy wyróżnić dwa przypadki:

- a) pomiar wykonuje się przy określonej wartości napięcia na zaciskach odbiornika oraz
- b) pomiar wykonuje się przy określonej wartości prądu płynącego przez odbiornik.

Ze względu na wartość natężenia prądu oraz wartość napięcia, przy którym pomiar ma być wykonany, należy wyróżnić 3 przypadki:

- a) wartości prądu i napięcia nie wykraczają poza wartości zakresu pomiarowego mierników i do wykonania pomiaru są zbędne przekładniki (włączenie mierników tzw. bezpośrednie),
- b) gdy ze względu na wartość prądu należy zastosować przekładnik prądowy (włączenie mierników tzw. półpośrednie), oraz
- c) gdy ze względu na wartość napięcia musi być zastosowany przekładnik napięciowy oraz prądowy (włączenie mierników tzw. pośrednie).

I. Pomiar mocy przy bezpośrednim włączeniu mierników

Do jednoczesnego wyznaczania mocy czynnej, biernej i pozornej odbiornika, przy bezpośrednim włączeniu mierników, stosuje się układ połączeń zawierający watomierz mocy czynnej, woltomierz i amperomierz. Sposób załączenia mierników do pomiaru mocy przy zadanej wartości napięcia podano na rys. 2, zaś do pomiaru przy zadanej wartości prądu podano na rys. 5.

I.1 Pomiar techniczny.

Przy pomiarze technicznym nie uwzględnia się prądów płynących przez obwody napięciowe mierników oraz spadku napięcia na obwodach prądowych. Moc wskazaną przez watomierz przyjmuje się jako moc czynną odbiornika, przez co zamiast wartości dokładnej P_o otrzymuje się wartość przybliżoną P_o' :

$$P_o' = P_w \quad (5)$$

Jeżeli watomierz nie ma podziałki podanej w watach, wówczas moc wskazaną przez watomierz oblicza się ze wzoru:

$$P_w = k_w \alpha, \quad (6)$$

gdzie:

α - wskazanie watomierza w działkach,

k_w – stała watomierza obliczana według wzoru:

$$k_w = \frac{P_{zn}}{\alpha_{zn}} = \frac{U_{zn} I_{zn} \cos \varphi_{zn}}{\alpha_{zn}}. \quad (7)$$

Wartość przybliżoną mocy pozornej S_o' oblicza się jako iloczyn napięcia U_v wskazanego przez woltomierz przez natężenie prądu I_a wskazanego przez amperomierz:

$$S_o' = U_v I_a \quad (8)$$

Moc bierną odbiornika oblicza się z zależności:

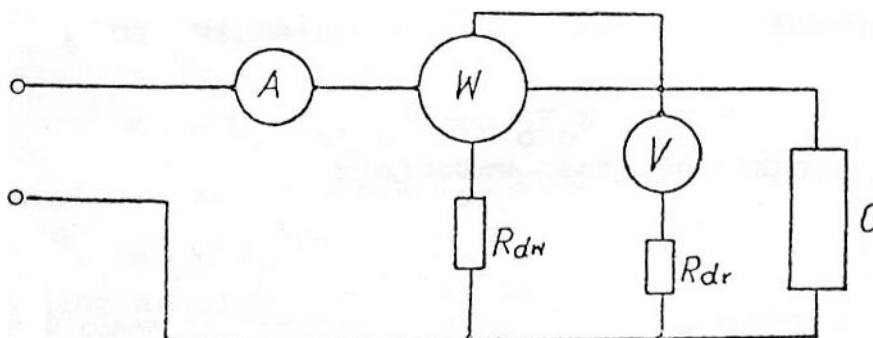
$$Q_o' = \sqrt{(U_v I_a)^2 - P_w^2} \quad (9)$$

zaś przybliżoną wartość cosinusa kąta fazowego odbiornika φ_o' z zależności

$$\cos \varphi_o' = \frac{P_w}{U_v I_a} \quad (10)$$

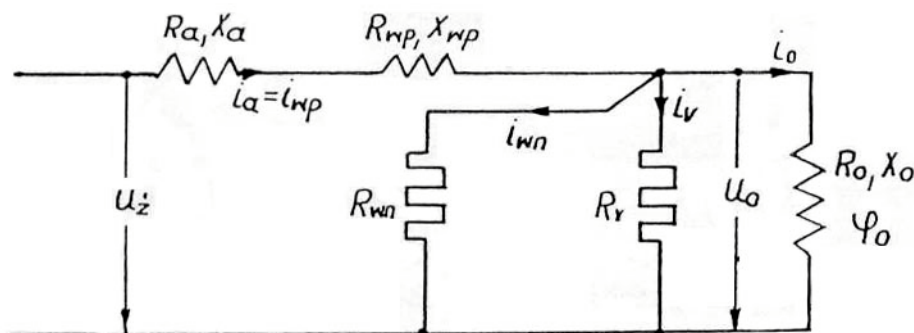
W pomiarze, od którego wymaga się większej dokładności, szczególnie przy pomiarze mocy stosunkowo niezbyt dużych, należy uwzględnić prądy płynące przez obwody napięciowe mierników jak też spadki napięcia na obwodach prądowych.

I.2. Pomiar mocy przy zadanej wartości napięcia

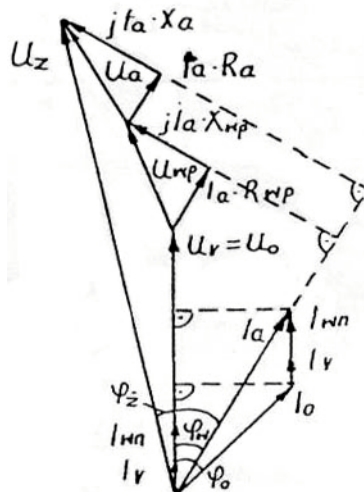


Rys. 2

Dla znalezienia związku między mocą odbiornika P_o a mocą P_w wskazaną przez watomierz elektrodynamiczny można przy częstotliwości technicznej z wystarczającą dokładnością przedstawić układ podany na rysunku 2 (odbiornik o charakterze indukcyjnym) jako zespół rezystancji połączonych w sposób podany na rysunku 3.



Rys.3



Rys. 4

I.2.a Wyznaczenie mocy czynnej

Moc czynna P_o pobierana przez odbiornik wyraża się zależnością:

$$P_o = U_o I_o \cos \varphi_o \quad (11)$$

zaś moc wskazana przez watomierz

$$P_w = U_{wn} I_{wp} \cos \varphi_w = U_o I_a \cos \varphi_w \quad (12)$$

gdyż napięcie U_{wn} przyłożone do obwodu napięciowego watomierza jest jednocześnie napięciem U_o na odbiorniku oraz $I_{wp} = I_a$. Z podanego wykresu na rysunku 4 wynika, że

$$I_a \cos \varphi_w = I_o \cos \varphi_o + I_v + I_{wn}, \quad (13)$$

a zatem

$$P_w = U_o (I_o \cos \varphi_o + I_v + I_{wn}) = U_o I_o \cos \varphi_o + U_v I_v + U_{wn} I_{wn}. \quad (14)$$

Oznaczając

$$P_v = U_v I_v, \quad (15)$$

jako stratę mocy w woltomierzu, oraz

$$P_{wn} = U_{wn} I_{wn}, \quad (16)$$

jako stratę mocy w obwodzie napięciowym watomierza, wzór na moc wskazywaną przez watomierz przyjmuje postać

$$P_w = P_o + P_v + P_{wn}. \quad (17)$$

Uwzględniając oznaczenia na rysunku 3 i rysunku 4 można napisać

$$P_v = \frac{U_v^2}{R_v} \quad \text{oraz} \quad P_{wn} = \frac{U_v^2}{R_{wn}}, \quad (18)$$

stąd moc czynną pobieraną przez odbiornik oblicza się z zależności:

$$P_o = P_w - (P_v + P_{wn}) = P_w - U_v^2 \left(\frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_{wn}} \right) \quad (19)$$

Przyjęcie mocy wskazanej przez watomierz jako mocy odbiornika, czyli przyjęcie zamiast wartości dokładnej P_o wartości przybliżonej $P_o = P_w$, powoduje popełnienie błędu, którego wartość wyraża zależność:

$$\Delta'_p = \frac{P_w - P_o}{P_o} 100\% = \frac{P_v + P_{wm}}{P_o} 100\% \quad (20)$$

Błąd ten ma zawsze wartość dodatnią i tym mniejszą, im większa jest moc odbiornika oraz im mniejsza jest strata mocy w woltomierzu i w obwodzie napięciowym watomierza.

I.2.b Wyznaczanie mocy pozornej

W celu wyznaczenia mocy pozornej odbiornika

$$S_o = U_o I_o \quad (21)$$

należy wyznaczyć natężenie prądu I_o , który płynie przez odbiornik przy napięciu U_o . Z trójkąta prądów na rysunku 4 wynika, że

$$I_a^2 = I_o^2 + (I_v + I_{wm})^2 + 2I_o(I_v + I_{wm}) \cos \varphi_o, \quad (22)$$

skąd po przekształceniu otrzymuje się I_o w postaci

$$I_o = \sqrt{I_a^2 - \frac{P_w^2 - P_o^2}{U_v^2}}, \quad (23)$$

Po podstawieniu wzór na moc pozorną odbiornika przyjmuje postać:

$$S_o = \sqrt{(U_v I_a)^2 - (P_w^2 - P_o^2)}. \quad (24)$$

Nieuwzględnienie poboru mocy przez mierniki i przyjęcie zamiast wartości dokładnej S_o wartości przybliżonej mocy pozornej S_o'

$$S_o' = U_v I_a, \quad (25)$$

powoduje popełnienie błędu:

$$\Delta'_{ps} = \frac{S_o' - S_o}{S_o} 100\% \quad (26)$$

którego wartość jest zawsze dodatnia.

I.2.c. Wyznaczanie mocy biernej

Moc bierna odbiornika Q_o obliczana jest z zależności w postaci

$$Q_o = \sqrt{S_o^2 - P_o^2} \quad (27)$$

lub

$$Q_o = \sqrt{(U_v I_a)^2 - P_w^2} \quad (28)$$

Należy zwrócić uwagę na to, że wzory na wartość dokładną Q_o i przybliżoną Q_o' są identyczne: zależność (9) i (28).

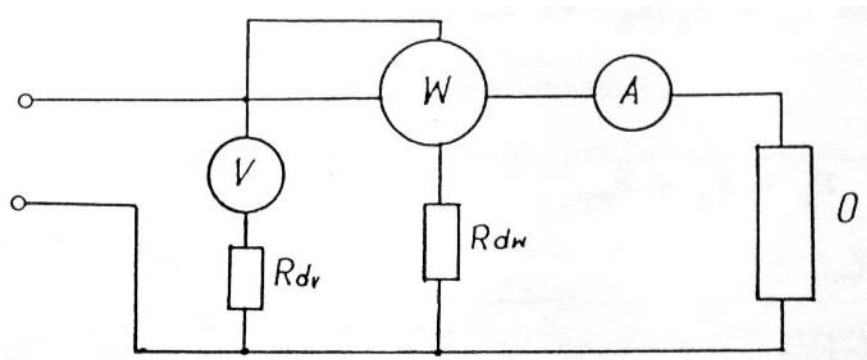
I.2.d. Wyznaczanie współczynnika mocy

Współczynnik mocy odbiornika $\cos \varphi_o$ oblicza się jako stosunek mocy czynnej do mocy pozornej odbiornika

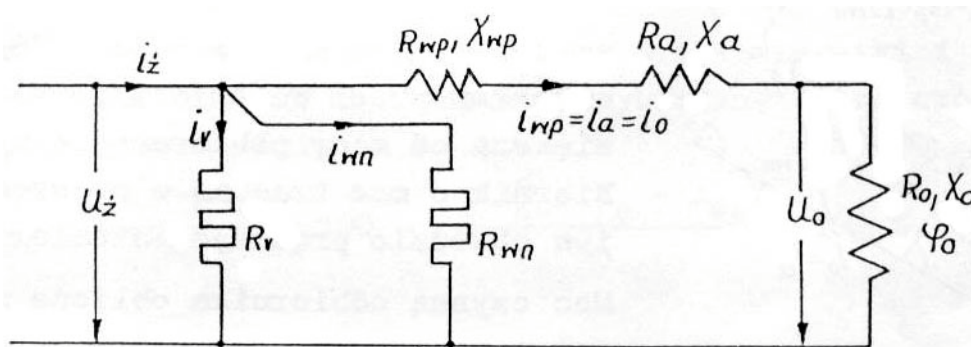
$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{S_o} \quad (29)$$

I.3. Pomiar mocy przy zadanej wartości prądu

W celu znalezienia związku między mocą czynną odbiornika P_o a mocą P_w , wskazaną przez watomierz elektrodynamiczny mocy czynnej, można przy częstotliwości sieciowej z wystarczającą dokładnością przedstawić układ podany na rysunku 5 (odbiornik o charakterze indukcyjnym) jako zespół elementów połączony w sposób podany na rysunku 6.



Rys. 5.



Rys. 6.

I.3.a. Wyznaczenie mocy czynnej

Moc czynna odbiornika wyraża się zależnością:

$$P_o = U_o I_o \cos \varphi_o, \quad (30)$$

zaś moc wskazana przez watomierz

$$P_w = U_{wn} I_{wp} \cos \varphi_w = U_v I_a \cos \varphi_w, \quad (31)$$

gdyż

$$U_{wn} = U_v \quad \text{oraz} \quad I_{wp} = I_o = I_a \quad (32)$$

Z wykresu pokazanego na rysunku 7 wynika, że

$$U_v \cos \varphi_w = U_o \cos \varphi_o + I_a R_a + I_a R_{wp}, \quad (33)$$

a zatem

$$P_w = I_a (U_o \cos \varphi_o + I_a R_a + I_a R_{wp}) = U_o I_o \cos \varphi_o + I_a^2 R_a + I_a^2 R_{wp}, \quad (34)$$

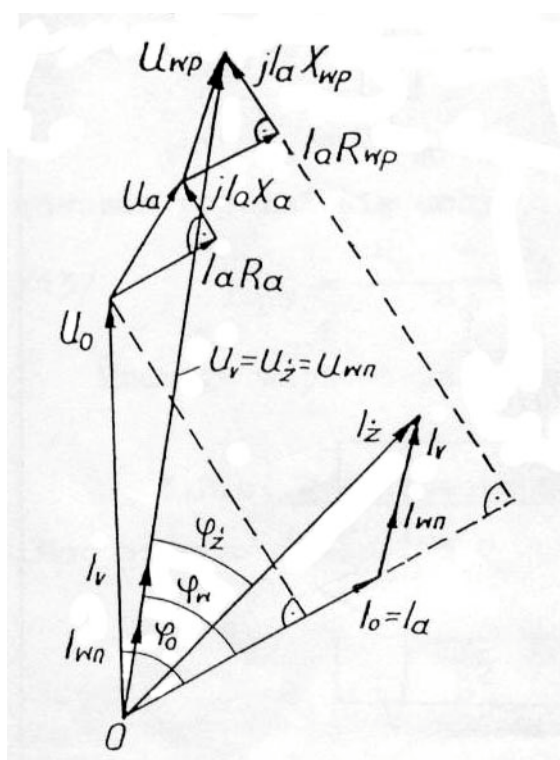
czyli

$$P_w = P_o + P_a + P_{wp}, \quad (35)$$

gdzie:

$P_a = I_a^2 R_a$ - strata mocy w amperomierzu

$P_{wp} = I_a^2 R_{wp}$ - strata mocy w obwodzie prądowym watomierza.



Rys. 7

Jak wynika z zależności (35) moc wskazana przez watomierz jest zawsze większa od mocy pobieranej przez odbiornik o moc traconą w amperomierzu i w obwodzie prądowym watomierza.

Moc czynną odbiornika oblicza się zatem ze wzoru:

$$P_o = P_w - (P_a + P_{wp}) = P_w - I_a^2 (R_a + R_{wp}) \quad (36)$$

Jeżeli nie uwzględnić poboru mocy przez mierniki i przyjąć moc wskazaną przez watomierz jako wartość przybliżoną mocy odbiornika $P_o' = P_w$, wówczas popełnia się błąd

$$\Delta_p' = \frac{P_w - P_o}{P_o} 100\% = \frac{P_a + P_{wp}}{P_o} 100\% \quad (37)$$

Błąd ten ma wartość zawsze dodatnią i tym mniejszą, im większa jest moc odbiornika oraz im mniejsza jest strata mocy w amperomierzu i w obwodzie prądowym watomierza.

I.3.b. Wyznaczenie mocy biernej

Moc bierną odbiornika oblicza się z zależności

$$Q_o = U_o I_o \sin \varphi_o, \quad (38)$$

należy wyznaczyć $U_o I_o \sin \varphi_o$. Z wykresu podanego na rysunku 7 wynika, że

$$U_o \sin \varphi_o = U_v \sin \varphi_w - I_a (X_a - X_{wp}) \quad (39)$$

gdzie

X_a – reaktancja amperomierza,

X_{wp} – reaktancja obwodu prądowego watomierza.

Ponieważ $I_o = I_a$, oraz

$$U_v I_o \sin \varphi_w = \sqrt{U_v^2 I_a^2 (1 - \cos^2 \varphi_w)} = \sqrt{(U_v I_a)^2 - P_w^2}, \quad (40)$$

zatem

$$Q_o = \sqrt{(U_v I_a)^2 - P_w^2} - I_a^2 (X_a + X_{wp}). \quad (41)$$

Jeżeli nie uwzględnić poboru mocy przez mierniki i przyjąć zamiast wartości dokładnej Q_o wartość przybliżoną Q_o' ze wzoru (9), wówczas popełnia się błąd:

$$\Delta_{pq}'' = \frac{Q_o' - Q_o}{Q_o} 100\% = \frac{I_a^2 (X_a + X_{wp})}{Q_o} 100\% \quad (42)$$

I.3.c. Wyznaczanie mocy pozornej

Moc pozorną odbiornika oblicza się z zależności

$$S_o = \sqrt{P_o^2 + Q_o^2}. \quad (43)$$

Jeżeli przyjąć dla mocy pozornej wartość przybliżoną

$$S_o' = U_v I_a, \quad (44)$$

wówczas popełnia się błąd

$$\Delta_{ps}'' = \frac{S_o' - S_o}{S_o} 100\%. \quad (45)$$

I.3.d. Wyznaczanie współczynnika mocy

Wartość $\cos \varphi_o$ oblicza się analogicznie jak w punkcie I.2.d, tzn. z zależności

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{S_o}, \quad (46)$$

zaś w przypadku posługiwania się wartością przybliżoną $\cos \varphi_o'$, wynikającą z zależności (10), popełnia się błąd

$$\Delta_{P\varphi}'' = \frac{\cos \varphi_o' - \cos \varphi_o}{\cos \varphi_o} 100\% . \quad (47)$$

I.4. Błąd wskazania watomierza wywołany kątem γ

Przy pomiarze mocy czynnej watomierzem elektrodynamicznym należy mieć na uwadze, że odchylenie watomierza jest proporcjonalne do mocy czynnej wówczas, gdy prąd I_{wn} , płynący przez cewkę napięciową watomierza, jest w fazie z napięciem U_{wn} przyłożonym do obwodu napięciowego watomierza (rys.8).

Jeżeli w watomierzu cewka napięciowa jest połączona szeregowo z rezystancją dodatkową, wówczas prąd I_{wn} nie jest w fazie z napięciem U_{wn} , gdyż tworzy z U_{wn} kąt γ (rys.9) i moc czynna wskazana przez watomierz nie jest równa

$$P_w = U_{wn} I_{wp} \cos \varphi_w , \quad (48)$$

lecz

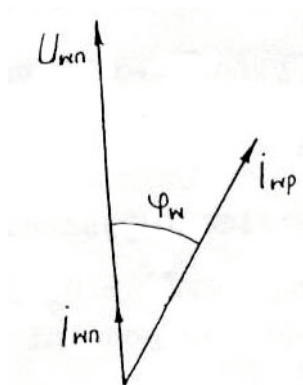
$$P_w'' = U_{wn} I_{wp} \cos(\varphi_w - \gamma) \cos \gamma . \quad (49)$$

Błąd wskazania watomierza wywołany kątem

$$\Delta_\gamma = \frac{P_w'' - P_w}{P_w} 100\% = \frac{\cos(\varphi_w - \gamma) \cos \gamma - \cos \varphi_w}{\cos \varphi_w} 100\% , \quad (50)$$

stąd

$$\Delta_\gamma = [(\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_w \sin \gamma) \cos \gamma - 1] 100\% \quad (51)$$



Rys. 8

Ponieważ kąt γ jest z reguły stosunkowo bardzo mały, więc można z dużą dokładnością przyjąć, że $\cos \gamma = 1$, oraz wyrazić $\sin \gamma$ za pomocą kąta γ wyznaczonego w minutach, czyli przyjąć, że $\sin \gamma = 0,000291 \gamma'$.

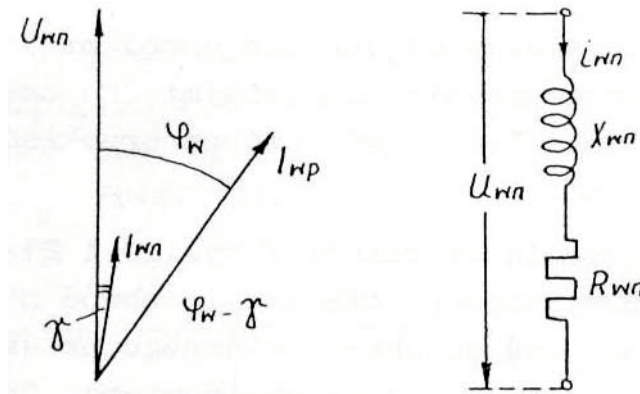
Błąd Δ_γ można zatem przybliżyć zależnością

$$\Delta_\gamma = 0,0291 \gamma' \operatorname{tg} \varphi_w \% , \quad (52)$$

zaś moc czynną P_w , jaką powinien wskazać watomierz o kącie $\gamma = 0$, z zależności

$$P_w = \frac{P_w''}{1 + 0,01 \Delta_\gamma} , \quad (53)$$

w której błąd Δ_γ jest wyrażany w procentach.



Rys. 9

Błąd Δ_γ ma wartość proporcjonalną do tangensa kąta fazowego i nie może być pomijany przy pomiarze mocy odbiornika o małym $\cos\varphi_o$ oraz ma wartość zależną od częstotliwości prądu, gdyż ze zmianą częstotliwości ulega zmianie kąt γ , albowiem

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{X_{wn}}{R_{wn}} = \frac{2\pi f L_{wn}}{R_{wn}} \quad (54)$$

II. Zastosowanie przekładników do pomiaru mocy

Przekładnik prądowy należy zastosować wówczas, gdy prąd płynący przez odbiornik jest większy od maksymalnego prądu, który jest dopuszczalny dla obwodu prądowego watomierza, zaś przekładnik napięciowy wówczas, gdy napięcie na odbiorniku jest większe od napięcia dopuszczalnego dla obwodu napięciowego watomierza, albo gdy napięcie przekracza granicę dopuszczalną ze względu na bezpieczeństwo przyrządów lub osoby wykonującej pomiar. Również można zastosować przekładnik prądowy wówczas, gdy moc mierzona jest większa od zakresu pomiarowego watomierza na skutek tego, że wartość $\cos\varphi_w$ wypada większa od wartości znamionowej.

Przy pomiarze mocy mogą mieć miejsce dwa przypadki: jeden, gdy ze względu na natężenie prądu lub $\cos\varphi_w$ należy zastosować przekładnik prądowy, oraz drugi, gdy ze względu na wartość napięcia należy zastosować przekładnik napięciowy. W pierwszym przypadku przekładnik napięciowy jest zbędny (włączenie mierników tzw. półpośrednie), zaś w drugim należy zastosować obok przekładnika napięciowego również prądowy, aby umożliwić przez uziemienie obu obwodów wtórnych zmniejszenie napięcia między cewkami watomierza oraz miernikami a ziemią (włączenie mierników tzw. pośrednie).

Przy półpośrednim włączeniu mierników (rys. 16 i 18) do obwodu wtórnego przekładnika prądowego włącza się obwód prądowy watomierza oraz amperomierz. Dla zmniejszenia napięcia między cewkami watomierza należy połączyć potencjalnie obwód wtórny przekładnika z obwodem napięciowym watomierza.

Przy pośrednim włączeniu mierników (rys. 20 i 21) do obwodu wtórnego przekładnika napięciowego włącza się obwód napięciowy watomierza oraz woltomierz, zaś do obwodu wtórnego przekładnika prądowego – obwód prądowy watomierza oraz amperomierz. Obwody wtórne obu

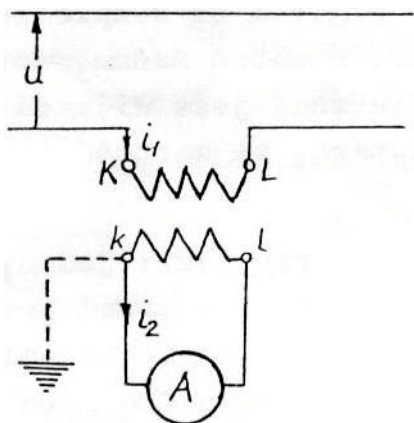
przekładników łączy się potencjalnie oraz uziemia się wraz z metalową obudową przyrządów i przekładników.

II.1 Błędy przekładników

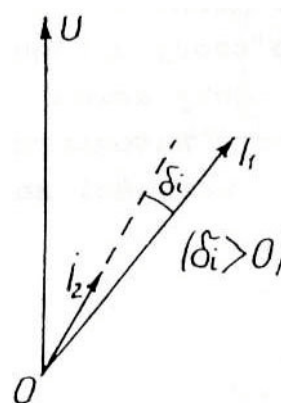
Zastosowanie przekładnika prądowego (rys.10) umożliwia zmianę natężenia prądu z I_1 w obwodzie pierwotnym na I_2 w obwodzie wtórnym. Faza prądu I_2 różni się od fazy prądu I_1 o kąt δ_i zwany błędem kątowym przekładnika prądowego (rys.11). Różnicę wartości przekładni znamionowej K_{izn} i przekładni rzeczywistej K_i

$$K_{izn} = \frac{I_{1zn}}{I_{2zn}}, K_i = \frac{I_1}{I_2} \quad (55)$$

charakteryzuje błąd przekładni Δ_i zwany błędem prądowym.

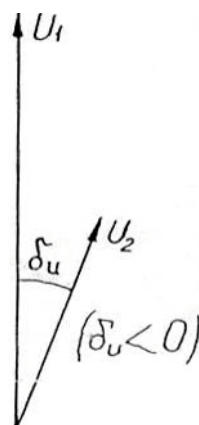
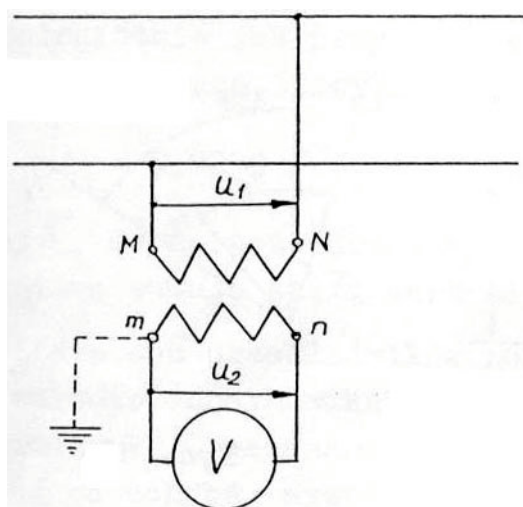


Rys. 10



Rys.11

$$\Delta_i = \frac{K_{izn} - K_i}{K_i} 100\% = \frac{I_2 K_{izn} - I_1}{I_1} 100\% \quad (56)$$



Rys.13

Zastosowanie przekładnika napięciowego (rys.12) pozwala na zmianę wartości napięcia z U_1 w obwodzie pierwotnym na U_2 w obwodzie wtórnym, jednak faza napięcia U_2 różni się od fazy napięcia U_1 o błąd kątowy δ_u (rys.13).

Błąd przekładni Δ_u , zwany błędem napięciowym, jest wywołany różnicą wartości przekładni znamionowej K_{uzn} i rzeczywistej K_u

$$K_{uzn} = \frac{U_{1zn}}{U_{2zn}}, \quad K_u = \frac{U_1}{U_2} \quad (57)$$

$$\Delta_u = \frac{K_{uzn} - K_u}{K_u} 100\% = \frac{U_2 K_{uzn} - U_1}{U_1} 100\% \quad (58)$$

II.2 Wpływ błędów przekładników na dokładność pomiaru prądu, napięcia i mocy

Przy zastosowaniu przekładników do pomiaru prądu i napięcia dokładność pomiaru zależy od błędu przekładni, a nie zależy od błędu kąтового przekładników:

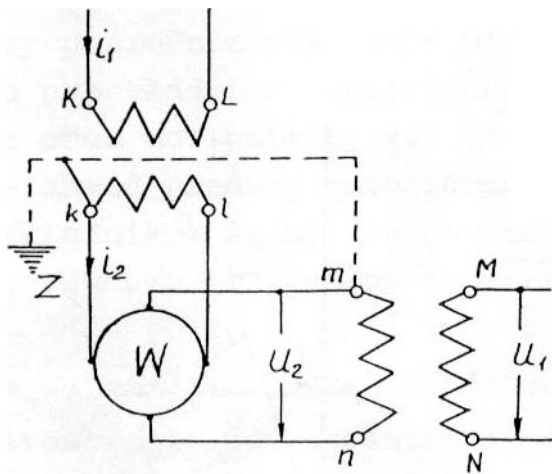
dla rys. 10

$$I_1 = I_2 K_{i zn}, \quad \frac{\Delta I_1}{I_1} = \frac{\Delta I_2}{I_2} + \Delta_i, \quad (59)$$

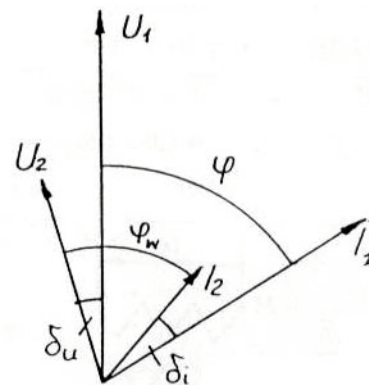
dla rys.12

$$U_1 = U_2 K_{u zn}, \quad \frac{\Delta U_1}{U_1} = \frac{\Delta U_2}{U_2} + \Delta_u. \quad (60)$$

Przy użyciu przekładników do pomiaru mocy czynnej za pomocą watomierza dokładność pomiaru zależy zarówno od błędu przekładni, jak i błędu kąтового obu przekładników.



Rys. 14



Rys. 15

Mierzona moc czynna

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi. \quad (61)$$

Moc wskazana przez watomierz

$$P_w = U_2 I_2 \cos \varphi_w = U_2 I_2 \cos(\varphi + \delta_u - \delta_i). \quad (62)$$

Moc którą wskazałby watomierz, gdyby błędy kątowe przekładników były równe zero

$$P_w = U_2 I_2 \cos \varphi. \quad (63)$$

Wartość mocy mierzonej obliczona jest bez uwzględnienia błędów kątowych i przekładni:

$$P' = P_w' K_{uzn} K_{izn}. \quad (64)$$

Dokładność pomiaru

$$\frac{\Delta P'}{P} = \frac{\Delta P_w'}{P_w'} + \Delta_u + \Delta_i = \frac{\Delta P_w}{P_w} + \Delta_\delta + \Delta_u + \Delta_i, \quad (65)$$

gdzie $\frac{\Delta P_w}{P_w}$ - błąd uwarunkowany klasą watomierza,

Δ_δ - błąd wskazania watomierza wywołany błędami kątowymi δ_u i δ_i .

Wartość błędu Δ_δ oblicza się w sposób następujący

$$\Delta_\delta = \frac{P_w' - P_w}{P_w} - 1 = \frac{\cos[\varphi - (\delta_i - \delta_u)]}{\cos \varphi} - 1 = \cos(\delta_i - \delta_u) + \sin(\delta_i - \delta_u) \operatorname{tg} \varphi - 1. \quad (66)$$

Można analogicznie jak przy wyprowadzeniu zależności na Δ_γ wyrażając Δ_δ w procentach, przyjmować, że

$$\Delta_\delta = 0,0291(\delta_i' - \delta_u') \operatorname{tg} \varphi \%, \quad (67)$$

Zazwyczaj δ_i' ma wartość dodatnią, zaś δ_u' - ujemną i wobec tego błędy kątowe sumują się i wartość Δ_δ wypada dodatnia.

Jeśli dla obu przekładników zostały na drodze pomiarowej wyznaczone wartości błędów kątowych δ_i' i δ_u' , wówczas można skorygować wartość P_w' , wskazaną przez watomierz, obliczając wartość P_w , wolną od błędu wywołanego błędami kątowymi, z zależności

$$P_w = \frac{P_w'}{1 + 0,01\Delta_\delta}, \quad (68)$$

w której błąd powinien być wyrażany w procentach.

W przypadku gdy do pomiaru mocy za pomocą watomierza został zastosowany jedynie przekładnik prądowy, wartość błędu Δ_δ oblicza się również z zależności (67) po przyrównaniu δ_u' do zera.

Przy pomiarze technicznym nie uwzględnia się błędów przekładni i błędu kąтового przekładników, jak też prądów płynących przez obwody napięciowe i spadku napięcia na obwodach prądowych przyrządów pomiarowych. Na skutek tego wynik pomiaru jest obarczony zwiększonym błędem, lecz jego wartość jest w wielu przypadkach niewielka ze względu na to, że moce mierzone przy zastosowaniu przekładników są zazwyczaj duże.

W przypadku, gdy $\cos \varphi_0$ odbiornika ma stosunkowo małą wartość, można dla zwiększenia dokładności pomiaru, stosownie do zależności (68), skorygować wskazania watomierza.

III. Pomiar mocy przy półpośrednim włączeniu mierników

III.1 Pomiar techniczny

Przy pomiarze technicznym, zarówno przy układzie połączeń podanym na rys.16 jak i przy układzie połączeń z rys.18, przyjmuje się dla mocy czynnej odbiornika wartość przybliżoną P_o' z zależności

$$P_o' = U_v I_a K_{izn} \cos \varphi_w = P_w K_{izn} \quad (69)$$

Dla mocy pozornej odbiornika przyjmuje się wartość przybliżoną S_o'

$$S_o' = U_v I_a K_{izn} \quad (70)$$

zaś przybliżoną wartość mocy biernej Q_o' oblicza się z zależności

$$Q_o' = \sqrt{(S_o')^2 - (P_o')^2} \quad (71)$$

lub

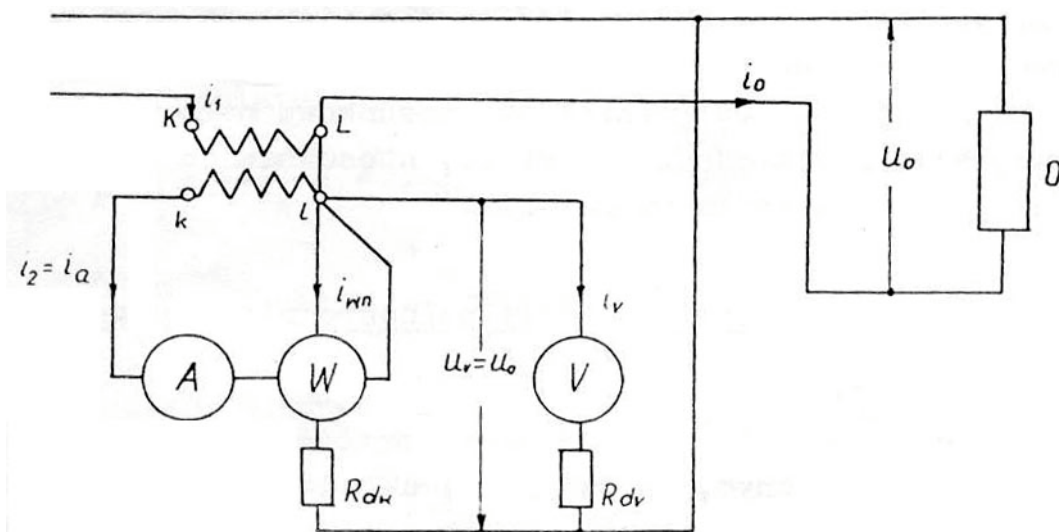
$$Q_o' = \sqrt{(U_v I_a)^2 - P_w^2} K_{izn} \quad (72)$$

Wartość przybliżona współczynnika mocy odbiornika

$$\cos \varphi_o' = \frac{P_o'}{S_o'} = \frac{P_w}{U_v I_a} \quad (73)$$

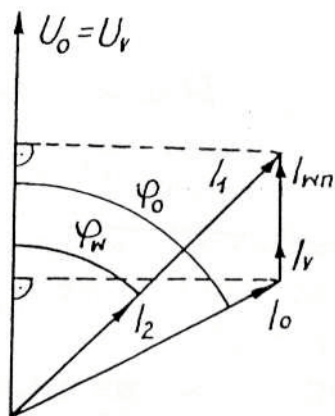
III. 2. Pomiar mocy przy zadanej wartości napięcia

Ponieważ pomiar mocy wykonuje się najczęściej przy zadanej wartości napięcia na zaciskach odbiornika i w niektórych przypadkach wymagane jest wykonanie pomiaru z większą dokładnością niż dokładność pomiaru technicznego, niżej zamieszczono zależności, które uwzględniają pobór mocy przez woltomierz oraz obwód napięciowy watomierza, dzięki czemu zostaje zwiększona dokładność pomiaru.



Rys. 16

Przyjmując, że prąd I_v płynący przez woltomierz jest w fazie z napięciem na woltomierzu U_v , oraz że prąd I_{wn} płynący przez obwód napięciowy watomierza jest w fazie z napięciem U_v , jak też nie uwzględniając błędów kątowych i błędów przekładnika prądowego (rys.17), można wyznaczyć związek między mocą czynną P_o odbiornika a mocą P_w wskazaną przez watomierz w sposób analogiczny jak przy bezpośrednim włączeniu mierników.



Rys. 17

Ponieważ

$$P_o = U_o I_o K_{izn} \cos \varphi_o \quad (74)$$

$$I_o \cos \varphi_o = I_1 \cos \varphi_w - (I_v + I_{wn}) \quad (75)$$

$$I_1 = I_2 K_{izn}, U_o = U_v \quad (76)$$

oraz

$$P_w = U_v I_2 \cos \varphi_w \quad (77)$$

zatem

$$P_o = U_o (I_1 \cos \varphi_w - (I_v + I_{wn})) = U_v I_2 K_{izn} \cos \varphi_w - (U_v I_v + U_v I_{wn}), \quad (78)$$

czyli

$$P_o = P_w K_{izn} - (P_v + P_{wn}). \quad (79)$$

Aby obliczyć moc pozorną odbiornika, należy wyznaczyć prąd I_o w sposób analogiczny jak przy bezpośrednim włączeniu mierników. Ponieważ

$$I_o = \sqrt{I_1^2 - \frac{(P_w K_{izn})^2 - P_o^2}{U_v^2}}, \quad (80)$$

zatem

$$S_o = \sqrt{(U_v I_a K_{izn})^2 - [(P_w K_{izn})^2 - P_o^2]} \quad (81)$$

Moc bierną odbiornika oblicza się z zależności w postaci

$$Q_o = \sqrt{S_o^2 - P_o^2} \quad (82)$$

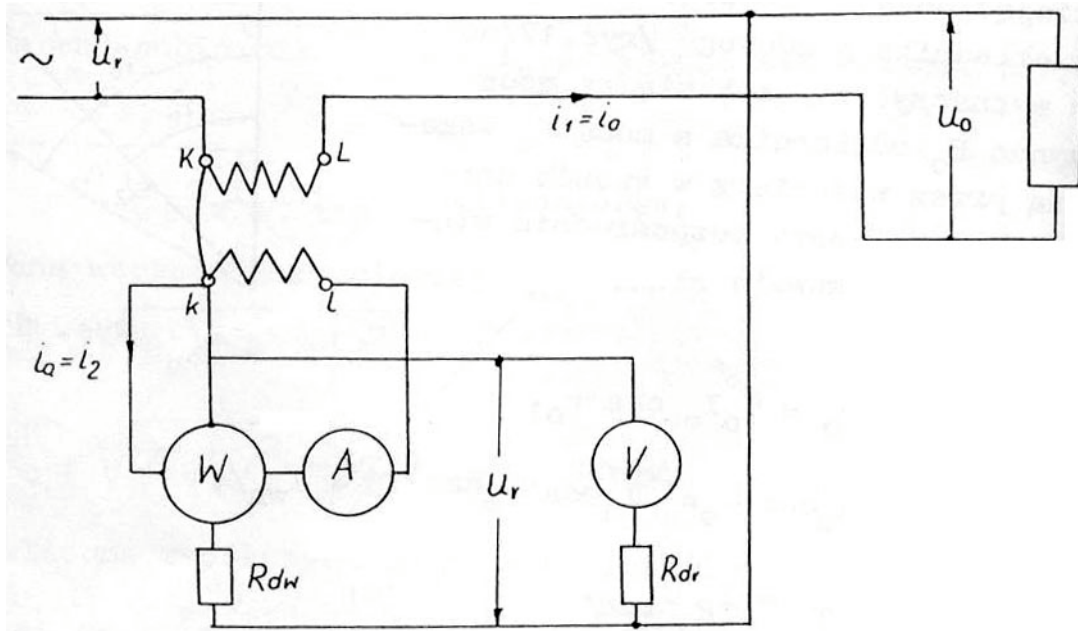
lub

$$Q_o = \sqrt{(U_v I_a)^2 - P_o^2} K_{izn} \quad (83)$$

współczynnik mocy odbiornika

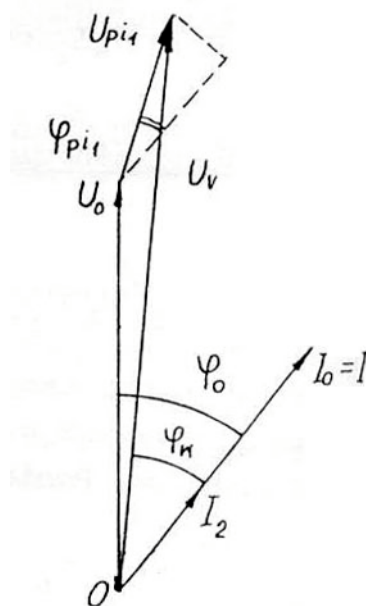
$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{S_o} \quad (84)$$

III.3. Pomiar mocy przy zadanej wartości prądu



Rys. 18

Zwiększenie dokładności pomiaru, wykonywanego przy układzie połączeń podanym na rys.18, w przypadku wyznaczenia mocy czynnej odbiornika można osiągnąć dzięki uwzględnieniu poboru mocy przez amperomierz i obwód prądowy watomierza oraz strat w samym przekładniku prądowym.



Rys.19

Na wykresie przedstawionym na rysunku 19 napięcie U_v wskazane przez woltomierz jest sumą geometryczną napięcia U_o , występującego na zaciskach odbiornika, oraz spadku napięcia U_{pi1} występującego na zaciskach uzwojenia pierwotnego przekładnika prądowego.

Moc czynną odbiornika

$$P_o = U_o I_o \cos \varphi_o \quad (85)$$

w przybliżeniu wskazywana jest przez watomierz, którego wskazanie opisuje wzór

$$P_w = U_v I_a \cos \varphi_w. \quad (86)$$

Z wykresu na rysunku 19 wynika, że

$$U_o \cos \varphi_o = U_v \cos \varphi_w - U_{pi1} \cos \varphi_{pi1}, \quad (87)$$

zatem

$$P_o = I_o (U_v \cos \varphi_w - U_{pi1} \cos \varphi_{pi1}) = U_v I_a K_{izn} \cos \varphi_w - U_{pi1} I_1 \cos \varphi_{pi1} \quad (88)$$

lub

$$P_o = P_w K_{izn} - (P_a + P_{wp} + P_{pi}), \quad (89)$$

gdź moc czynna $U_{pi1} I_1 \cos \varphi_{pi1}$, wyznaczona na zaciskach obwodu pierwotnego przekładnika, daje łączne straty jakie zachodzą w samym przekładniku oraz w przyrządach pomiarowych załączonych do jego obwodu wtórnego, a zatem składa się z mocy czynnej P_a pobieranej przez amperomierz, z mocy czynnej P_{wp} pobieranej przez obwód prądowy watomierza oraz z mocy czynnej P_{pi} idącej na pokrycie strat w miedzi jego uzwojenia pierwotnego i wtórnego oraz strat w żelazie jego obwodu magnetycznego.

Ponieważ w przekładniku prądowym straty w żelazie w stosunku do strat w miedzi uzwojeń, z powodu małej indukcji w rdzeniu, są niewielkie, zatem można przyjmować, że straty P_{pi} zachodzące w samym przekładniku są proporcjonalne do kwadratu prądu I_1 .

Oznaczając straty w przekładniku prądowym przy prądzie znamionowym I_{1zn} przez P_{pizn} , można obliczyć straty P_{pi} występujące przy prądzie I_1 z zależności:

$$P_{pi} = P_{pizn} \frac{I_1^2}{I_{1zn}^2} = P_{pizn} \left(\frac{I_a K_{izn}}{I_{1zn}} \right)^2 \quad (90)$$

Ponieważ

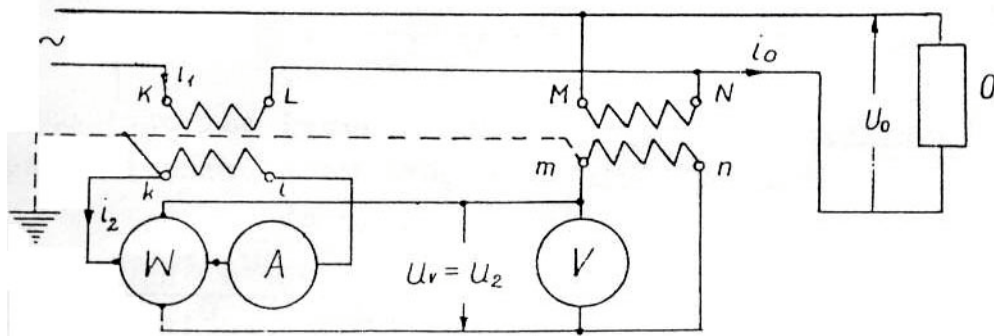
$$P_a = I_a^2 R_a \quad \text{oraz} \quad P_{wp} = I_a^2 R_{wp}, \quad (91)$$

zatem

$$P_o = P_w K_{izn} - I_a^2 \left(R_a + R_{wp} + \frac{P_{pizn}}{I_{1zn}^2} K_{izn}^2 \right) \quad (92)$$

IV. Pomiar mocy przy pośrednim włączeniu mierników

IV.1. Przy zadanej wartości napięcia



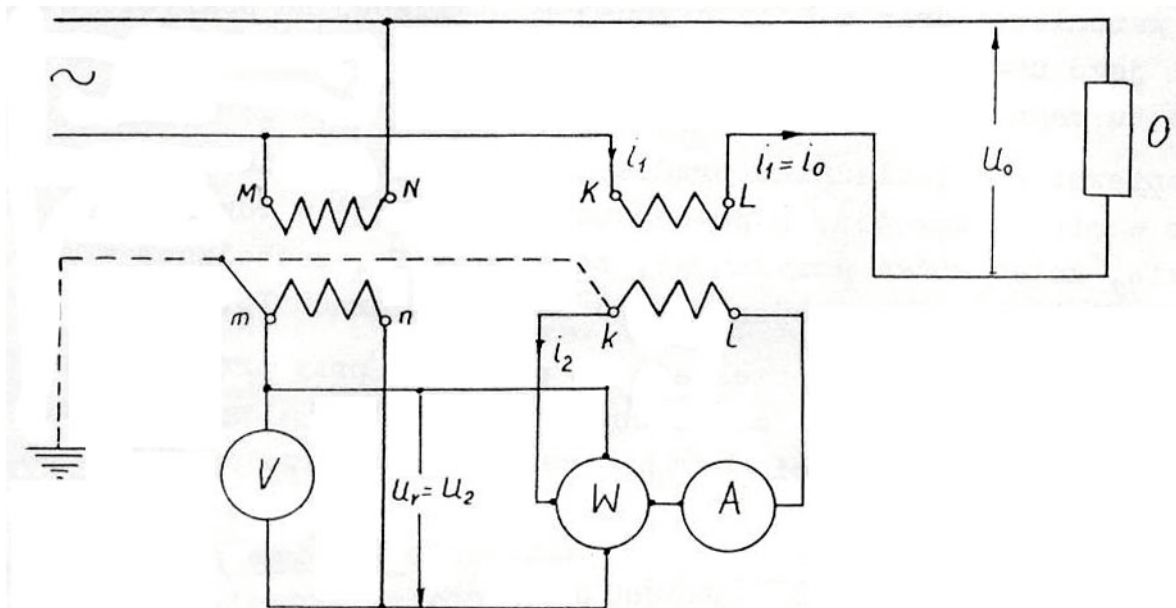
Rys.20

Układy połączeń z pośrednim włączeniem mierników (rys.20 i 21) stosowane są przy pomiarze mocy zazwyczaj o wartości stosunkowo znacznej i dlatego uwzględnienie poboru mocy przez przyrządy pomiarowe staje się zbędne, gdyż praktycznie nie wpływa na zwiększenie dokładności pomiaru.

Moc czynna odbiornika może być zatem obliczona ze wzoru:

$$P_o \approx P_o' = P_w K_{u2n} K_{i2n} \quad (93)$$

IV.2. Przy zadanej wartości prądu



Rys.21

Moc pozorna

$$S_o \approx S_o' = U_v I_a K_{u2n} K_{i2n} \quad (94)$$

Moc bierna

$$Q_o \approx Q_o' = \sqrt{S_o'^2 - P_o'^2} \quad (95)$$

oraz współczynnik mocy odbiornika

$$\cos \varphi_o \approx \cos \varphi_o' = \frac{P_w}{U_v I_a} \quad (96)$$

Jeżeli przy pomiarze mocy czynnej przy zadanej wartości napięcia (rys.20) wskazane jest uwzględnienie poboru mocy przez przyrządy pomiarowe, wówczas można obliczyć P_o z zależności

$$P_o = P_w K_{uzn} K_{izn} - \left[P_v + P_{wn} + P_{puzn} \left(\frac{U_v K_{uzn}}{U_{1zn}} \right)^2 \right] \quad (97)$$

zaś wykonując pomiar mocy czynnej przy zadanej wartości prądu (rys. 21) P_o oblicza się z zależności

$$P_o = P_w K_{uzn} K_{izn} - \left[P_a + P_{wp} + P_{pizn} \left(\frac{I_a K_{izn}}{I_{1zn}} \right)^2 \right] \quad (98)$$

gdzie

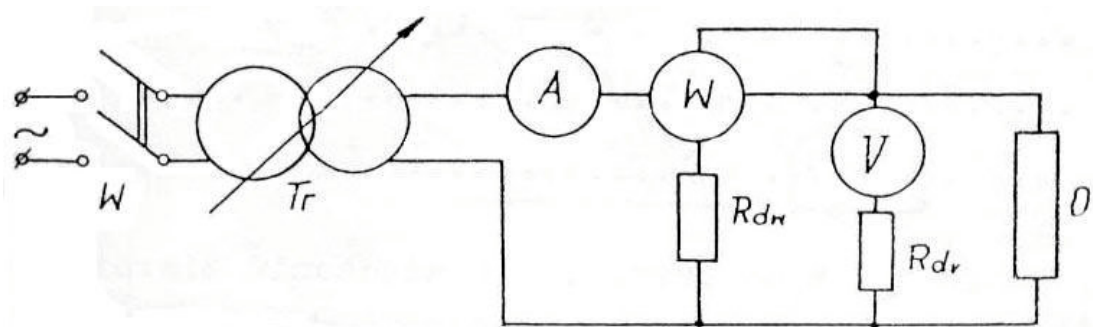
P_{puzn} - znamionowa moc czynna przekładnika napięciowego,

P_{pizn} - znamionowa moc czynna przekładnika prądowego.

V. Wykonanie pomiarów

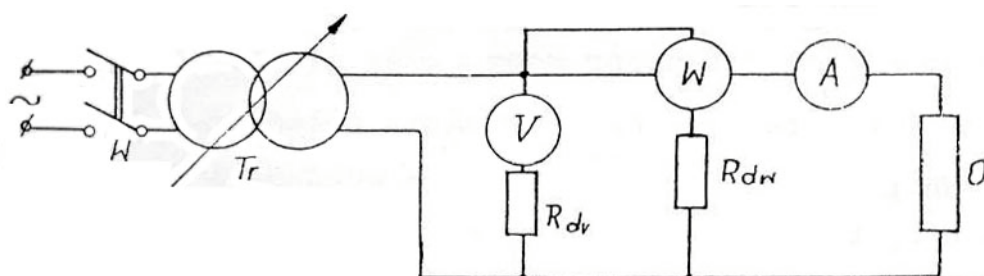
V.1. Układy połączeń

1. Pomiar mocy przy bezpośrednim włączeniu przyrządów i zadanej wartości napięcia na zaciskach odbiornika.



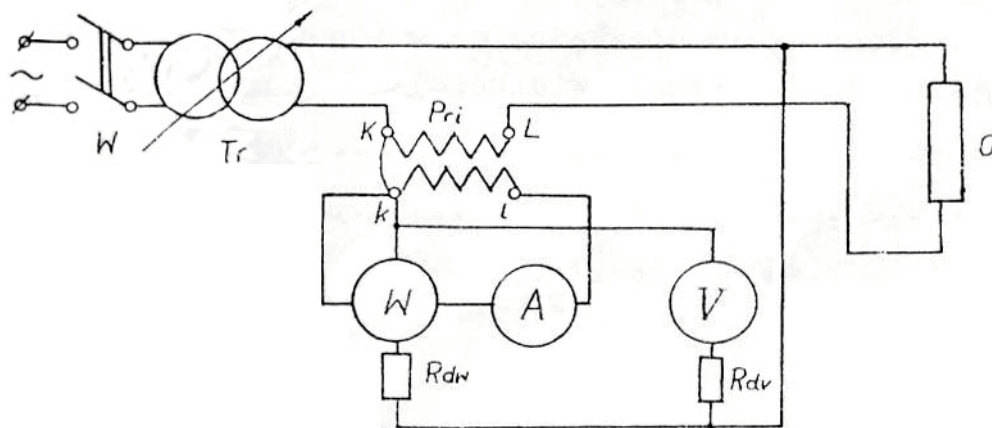
Rys.22

2. Pomiar przy bezpośrednim włączeniu przyrządów i zadanej wartości prądu płynącego przez odbiornik



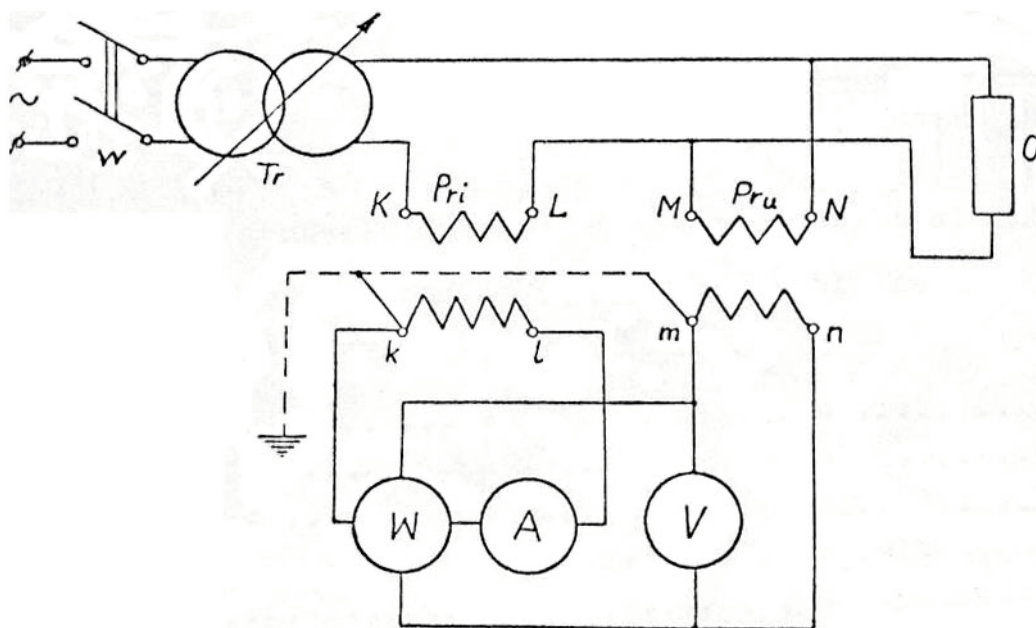
Rys.23

3. Pomiar mocy przy półpośrednim włączeniu przyrządów i zadanej wartości prądu płynącego przez odbiornik.



Rys.24

4. Pomiar mocy przy pośrednim włączeniu przyrządów i zadanej wartości napięcia na zaciskach odbiornika.



Rys.25

Oznaczenia:

W – watomierz

V – woltomierz

A – amperomierz

P_{ri} – przekładnik prądowy

P_{ru} – przekładnik napięciowy

Tr – autotransformator

O – odbiornik

w – wyłącznik

V.2. Postępowanie

1. Wyznaczyć moc czynną, bierną i pozorną oraz współczynnik mocy jednofazowego odbiornika w układach pomiarowych według rysunków 22 i 23 (bezpośrednie włączenie przyrządów w układ) dla napięcia zasilającego $U=230V$ (jeżeli prowadzący zajęcia nie poda innego).

- W tabeli zamieścić wyniki pomiarów bez i z uwzględnieniem poboru mocy przez przyrządy.
- Dla obydwu układów pomiarowych obliczyć błędy pomiaru mocy czynnej, biernej, pozornej oraz współczynnika mocy powodowane nieuwzględnieniem poboru mocy przez przyrządy.

Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w Tabelach 1 - 3, dla każdego układu pomiarowego oddzielnie.

Tabela1

Lp.	Odbiornik	I_a	U_v	k_w	α	P_w	P_o'	Q_o'	S_o'	$\cos\phi_o'$
-	-	A	V	W/dz	dz	W	W	VAr	VA	-

Dane przyrządów:

a) watomierz

$$U_N = \dots\dots\dots$$

$$R_{wn} = \dots\dots\dots$$

$$I_N = \dots\dots\dots$$

$$R_{wp} = \dots\dots\dots$$

$$X_{wp} = \dots\dots\dots$$

b) woltomierz

$$U_N = \dots\dots\dots$$

$$R_v = \dots\dots\dots$$

c) amperomierz

$$I_N = \dots\dots\dots$$

$$R_a = \dots\dots\dots$$

$$X_a = \dots\dots\dots$$

Tabela 2 – wpływ przyrządów na pomiar

Lp.	Odbiornik	I_a	U_v	P_w	P_a	P_{wp}	P_o	Q_o	S_o	$\cos\phi_o$
-	-	A	V	W	W	W	W	VAr	VA	-

Tabela 3 – błędy

Lp.	Odbiornik	Δ'_p	Δ'_{pq}	Δ'_{ps}	$\Delta'_{p\phi}$
-	-	W	V	W	-

2. Wyznaczyć moc czynną, bierną i pozorną oraz współczynnik mocy jednofazowego odbiornika w układzie pomiarowym zestawionym według rysunku 24 (półpośrednie włączenie przyrządów w układ) dla napięcia zasilającego $U=230V$ (jeżeli prowadzący zajęcia nie poda innego).

Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w Tabeli 4. Błąd Δ_p wyliczyć z wykorzystaniem wzoru (20) po podstawieniu odpowiedniego dla układu wzoru na P_o .

Tabela 4

Lp.	Odbiornik	I_a	K_i	I_o	U_v	k_w	α	P_w	P_o'	P_a	P_{wp}	P_{pi}	P_o	Δ_p
-	-	A	-	A	V	W/dz	dz	W	W	W	W	W	W	%

Dane przyrządów:

a) watomierz

$$U_N = \dots\dots\dots$$

$$R_{wn} = \dots\dots\dots$$

$$I_N = \dots\dots\dots$$

$$R_{wp} = \dots\dots\dots$$

b) woltomierz

$$U_N = \dots\dots\dots$$

$$R_v = \dots\dots\dots$$

c) amperomierz

$$I_N = \dots\dots\dots$$

$$R_a = \dots\dots\dots$$

d) przekładnik prądowy

$$I_{1N} = \dots\dots\dots$$

$$P_{izn} = \dots\dots\dots$$

3. Wyznaczyć moc czynną, bierną i pozorną oraz współczynnik mocy jednofazowego odbiornika w układzie pomiarowym zestawionym według rysunku 25 (pośrednie włączenie przyrządów w układ) dla napięcia zasilającego $U=230V$ (jeżeli prowadzący zajęcia nie poda innego).

Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w Tabeli 5. Błąd Δ_p wyliczyć z wykorzystaniem wzoru (20) po podstawieniu odpowiedniego dla układu wzoru na P_o .

Tabela 5

Lp.	Odbiornik	I_a	K_i	I_o	U_v	K_u	U_o	k_w	α	P_w	P_o'	Q_o'	S_o'	$\cos \phi_o'$	Δ_p
-	-	A	-	A	V	-	V	W/dz	dz	W	W	VAr	VA	-	%

Dane przyrządów:

a) watomierz

$U_N = \dots\dots\dots$

$R_{wn} = \dots\dots\dots$

$I_N = \dots\dots\dots$

$R_{wp} = \dots\dots\dots$

b) woltomierz

$U_N = \dots\dots\dots$

$R_v = \dots\dots\dots$

c) amperomierz

$I_N = \dots\dots\dots$

$R_a = \dots\dots\dots$

d) przekładnik prądowy

$I_{1N} = \dots\dots\dots$

$P_{izn} = \dots\dots\dots$

e) przekładnik napięciowy

$U_{1N} = \dots\dots\dots$

$P_{Uzn} = \dots\dots\dots$

VI. Opracowanie wyników i przygotowanie sprawozdania

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- schematy układów pomiarowych
- tabele z wynikami pomiarów i obliczeń,
- wzory obliczeniowe i przykładowe obliczenia,
- wnioski z przeprowadzonych pomiarów, szczególnie należy zwrócić uwagę na porównanie uzyskanych wyników uzyskanych w pomiarach mocy tego samego odbiornika w różnych układach pomiarowych

VII. LITERATURA

1. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A., *Metrologia elektryczna*, WNT, Warszawa 2000.
2. Lebson S., *Podstawy miernictwa elektrycznego*, WNT, Warszawa 1972.
3. Tumański S., *Technika pomiarowa*, WNT, Warszawa 2007.