

Ćwiczenie 5

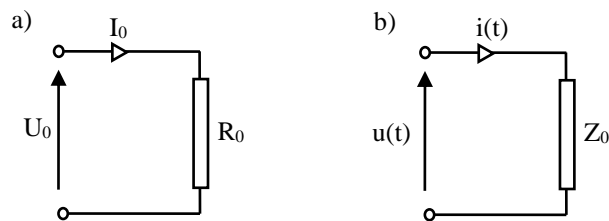
Metody pomiaru mocy

5.1. Wstęp

Definicje

Moc elektryczna jest pochodną energii elektrycznej względem czasu.

W obwodzie elektrycznym moc jest energią elektryczną wydzielaną w obciążeniu w jednostce czasu.



Rys. 5.1. Obwody prądu stałego a) i zmiennego b)

Moc w obwodach prądu stałego (rys. 5.1a) można wyznaczyć z zależności:

$$P_0 = \frac{U_0^2}{R_0} = R_0 \cdot I_0^2 = U_0 \cdot I_0$$

W obwodach prądu zmiennego (rys. 5.1b) określa się chwilową wartość mocy:

$$p(t) = i(t) \cdot u(t)$$

Chwilową wartość mocy mierzy się w przypadku badania stanów nieustalonych.

W miernictwie elektronicznym najważniejszy jest pomiar mocy średniej. Jeżeli badany przebieg jest okresowy to mierzy się wartość średnią mocy za okres (T):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot u(t) \cdot dt$$

Dla sygnałów sinusoidalnych rozróżnia się:

$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ – moc czynną wyrażaną w watach [W],

$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$ – moc bierną wyrażaną w warach [var],

$S = U \cdot I$ – moc pozorną wyrażaną w woltoamperach [VA].

Gdzie: U, I – wartości skuteczne napięcia i natężenia prądu,

φ – przesunięcie fazy między napięciem i natężeniem prądu.

Moc jest wielkością którą można mierzyć w całym pasmie częstotliwości.

Zakres mierzonych wartości od 10^{-18} [W] do 10^9 [W].

Wynik pomiaru mocy może być podany w jednostkach bezwzględnych (W, mW itp.)

lub w jednostkach względnych (dB).

$$P(\text{dB}) = 10\log P_x/P_0$$

Gdzie: P_x – moc mierzona, P_0 – moc odniesienia (najczęściej $P_0 = 1$ mW lub 1 W).

Jeżeli $P_0 = 1$ mW to jednostką jest [dBmW] lub [dBm].

Jeżeli $P_0 = 1$ W to jednostką jest [dBW].

Jeżeli P_0 jest nieznane to jednostką jest [dB]. W tym przypadku nie jest możliwe wyznaczenie wartości mocy w jednostkach bezwzględnych (W, mW itp.) ale można wyznaczyć wzmocnienie lub tłumienie badanego układu.

5.2. Klasyfikacja oraz właściwości pomiarów mocy

1) W zależności od wartości mierzonej mocy rozróżnia się:

- pomiary mocy b. małej mniejszej od 10 μ W,
- pomiary mocy małej od 10 μ W do 100 mW,
- pomiary mocy średniej od 100 mW do 10 W,
- pomiary mocy dużej powyżej 10 W.

2) Zależnie od pasma częstotliwości:

- pomiary mocy przy prądzie stałym,
- pomiary w zakresie częstotliwości technicznych (50 Hz do 400 Hz),
- pomiary w zakresie m.cz. i w.cz.,
- pomiary w zakresie b.w.cz. i mikrofalowym.

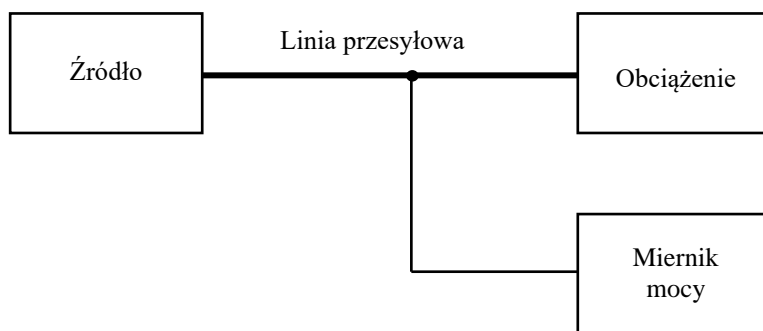
3) Zależnie od sposobu pomiaru:

- pomiary bezpośrednie wykonane za pomocą przyrządów zwanych watomierzami,
- pomiary pośrednie polegające na pomiarze wielkości wchodzących w skład zależności opisujących moc a następnie jej obliczenie.

4) W zakresie b.w.cz. i mikrofalowym można mierzyć:

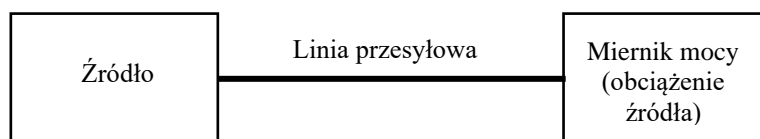
- moc przepływową,
- moc absorbowaną (pochłanianą).

W przypadku pomiaru mocy przepływowej (rys. 5.2), miernik mocy włączony jest między źródłem a obciążeniem i mierzy tylko niewielką część mocy źródła. Sposób ten pozwala na pomiar mocy przepływającej do obciążenia w warunkach rzeczywistych.



Rys. 5.2. Pomiar mocy przepływowej

Pomiar mocy absorbowanej (całkowitej traconej w obciążeniu) polega na włączeniu miernika mocy w miejsce rzeczywistego obciążenia (rys. 5.3). Ponieważ impedancja wejściowa watomierza jest różna od impedancji rzeczywistego obciążenia, nie jest możliwy pomiar mocy w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W praktyce częściej jest wykonywany ten sposób pomiaru.



Rys. 5.3. Pomiar mocy absorbowanej

Pomiary mocy mają największe znaczenie w zakresie częstotliwości technicznych oraz mikrofalowych.

W zakresie częstotliwości technicznych zjawiska elektryczne są wykorzystywane głównie do celów energetycznych a pomiary mocy i energii służą głównie gospodarce narodowej. Przy tej częstotliwości pomiar mocy jest łatwy i dokładny. Wykonuje się go głównie za pomocą watomierzy elektronicznych oraz watomierzy elektrodynamicznych lub ferrodynamicznych .

Przy prądzie stałym oraz w zakresie m.cz. i w.cz. pomiar mocy ma ograniczone znaczenie, podstawowymi wielkościami opisującymi właściwości układów i sygnałów są: napięcie, natężenie prądu oraz impedancja. W przypadku konieczności pomiaru mocy wykonuje się pomiary metodą bezpośrednią za pomocą watomierzy lub metodą pośrednią.

W zakresie częstotliwości mikrofalowych (300 MHz ÷ 300 GHz) pomiary mocy mają znaczenie podstawowe. Przy tych częstotliwościach, w liniach przesyłowych występują fale stojące, co powoduje, że wartości napięć i prądów w poszczególnych punktach linii transmisyjnej są różne. Wyniki pomiarów zależą od miejsca włączenia przyrządów. Natomiast moc dla danej linii transmisyjnej ma wartość prawie stałą niezależną od odległości (wartość mocy zmienia się nieznacznie z powodu tłumienia odpowiedniej części linii).

W związku z tym, przy badaniu układów i sygnałów mikrofalowych podstawową wielkością jest moc. W tym zakresie częstotliwości stosuje się watomierze o specjalnej konstrukcji, przetwarzające moc fali elektromagnetycznej na ciepło.

5.3. Metody pomiaru mocy

5.3.1. Metody bezpośrednie pomiaru mocy

Bezpośrednie pomiary mocy wykonuje się za pomocą watomierzy analogowych lub cyfrowych.

Zasada pracy watomierzy pracujących w zakresie częstotliwości m.cz. i w.cz. polega na mnożeniu wartości chwilowych prądu i napięcia. Mnożenie to może być wykonywane w sposób bezpośredni lub pośredni.

Urządzenia działające na zasadzie mnożenia bezpośredniego:

- ustroje pomiarowe elektrodynamiczne i ferrodynamiczne,
- czujniki z przetwornikami Halla,
- specjalne układy elektroniczne wykorzystujące np. tranzystory polowe.

W urządzeniach z mnożeniem pośrednim, w celu otrzymania odpowiedniego iloczynu wykorzystuje się inne działania matematyczne jak: sumowanie, odejmowanie, podnoszenie do kwadratu, logarytmowanie i inne.

Dla częstotliwości większych od 100 MHz, stosuje się watomierze przetwarzające energię drgań elektromagnetycznych na ciepło (najczęściej).

Podstawowe parametry metrologiczne watomierzy:

- zakres mierzonych wartości,
- zakres częstotliwości,
- dokładność,
- czas ustalania się wskazań,
- współczynnik fali stojącej (dotyczy watomierzy pracujących w zakresie mikrofalowym).

Przykłady

1) Watomierz elektrodynamiczny

Miernik ten zbudowany jest w oparciu o ustrój pomiarowy elektrodynamiczny. Składa się z cewki prądowej (cewka nieruchoma) oraz z cewki napięciowej (cewka ruchoma). Cewka napięciowa jest połączona szeregowo z opornikiem dodatkowym R_d . Odchylenie organu ruchomego (α) jest funkcją mocy.

Dla pomiarów stałoprądowych: $\alpha = f(U_0 \cdot I_0) = f(P_0)$

gdzie: U_0 , I_0 – wartości napięcia i prądu stałego.

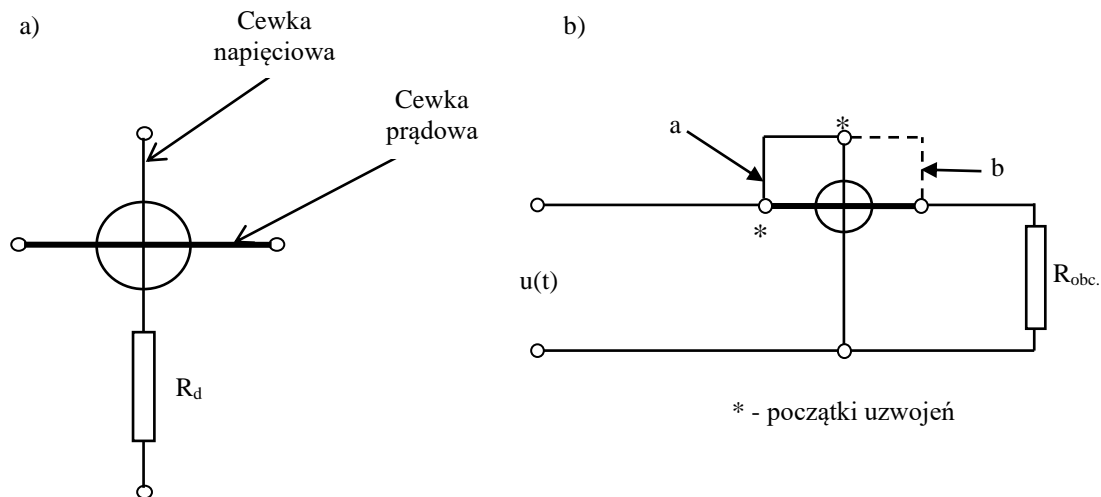
Dla pomiarów zmiennoprądowych: $\alpha = f(U \cdot I \cdot \cos\varphi) = f(P)$

gdzie: U, I – wartości skuteczne napięcia i prądu,

φ – przesunięcie fazy między napięciem i natężeniem prądu,

P – moc czynna.

Na rys. 5.4. Przedstawiono symbol watomierza elektrodynamicznego a) oraz sposoby jego włączenia do obwodu badanego b).



Rys. 5.4. Watomierz elektrodynamiczny:

a) symbol,

b) włączenie watomierza elektrodynamicznego do obwodu:

– z poprawnie mierzonym prądem (połączenie a),

– z poprawnie mierzonym napięciem (połączenie b).

Mierzona moc: $P_x = C_w \cdot \alpha_x$

gdzie: C_w – stała watomierza,

α_x – wychylenie wskazówki miernika pod wpływem wartości mierzonej mocy.

Stałą watomierza oblicza się z zależności:

– dla pomiarów stałoprądowych:

$$C_w = \frac{U_N \cdot I_N}{\alpha_{\max}}$$

– dla pomiarów zmiennoprądowych:

$$C_w = \frac{U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N}{\alpha_{\max}}$$

gdzie: U_N, I_N – wartości nominalne napięcia i prądu,

$\cos \varphi_N$ – wartość nominalna współczynnika mocy (najczęściej $\cos \varphi_N = 1$),

α_{\max} – maksymalna liczba działek.

Właściwości metrologiczne:

- zakres mierzonych wartości zależy od wartości nominalnych prądu i napięcia,
- zakres częstotliwości: prąd stały oraz częstotliwości sieciowe,
- watomierze elektrodynamiczne budowane są w klasach dokładności 0,1 oraz 0,2.
- przyrządy te są bardzo czułe na przeciążenia,
- moc pobierana przez watomierz wynosi kilka watów.

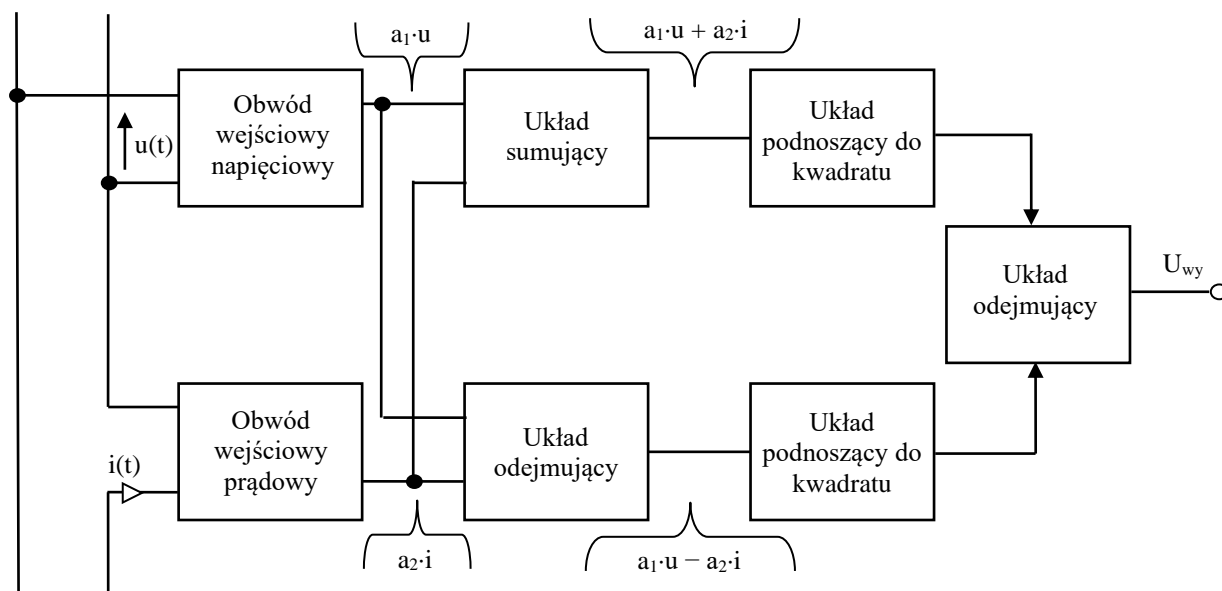
Obecnie watomierze elektrodynamiczne są coraz rzadziej stosowane¹, ich miejsce zajmują watomierze elektroniczne analogowe oraz cyfrowe.

2) Metoda z mnożeniem pośrednim

Przykładowe urządzenie z mnożeniem pośrednim przedstawiono na rys. 5.5.

Wykorzystano tu następującą zależność matematyczną:

$$x \cdot y = 0,25[(x + y)^2 - (x - y)^2]$$



$$U_{wy} = (a_1 \cdot u + a_2 \cdot i)^2 - (a_1 \cdot u - a_2 \cdot i)^2 = a \cdot u \cdot i$$

Rys. 5.5. Analogowy pośredni układ mnożący

Przedstawiony układ zbudowany jest na kwadratorach tzn. elementach w których sygnał wyjściowy jest wprost proporcjonalny do kwadratu sygnału wejściowego.

Napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do iloczynu wartości chwilowych napięcia i prądu: $U_{wy} = (a_1 \cdot u + a_2 \cdot i)^2 - (a_1 \cdot u - a_2 \cdot i)^2 = a \cdot u \cdot i$

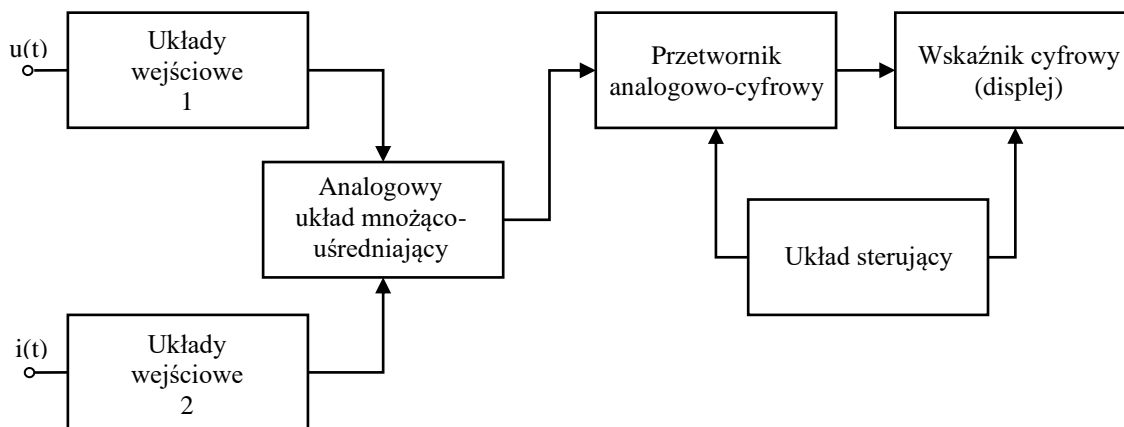
Przy pomiarach mocy prądu stałego $U_{wy} = a \cdot U_0 \cdot I_0 = a \cdot P$.

¹ Pełniejsze informacje o budowie, działaniu i zastosowaniach ustrojów pomiarowych elektrodynamicznych i ferrodynamicznych można znaleźć w literaturze dodatkowej znajdującej się na końcu rozdziału.

Przy pomiarach mocy sygnałów sinusoidalnych należy na wyjściu zastosować układ uśredniający. Może to być np. wskaźnik magnetoelektryczny.

3) **Watomierz cyfrowy z analogowym układem mnożącym**

Uproszczony schemat blokowy watomierza cyfrowego wykorzystującego zasadę mnożenia analogowego² przedstawiono na rys. 5.6.



Rys. 5.6. Watomierz cyfrowy z analogowym układem mnożącym

Napięcie stałe z wyjścia układu mnożąco-uśredniającego jest wprost proporcjonalne do mocy czynnej badanego sygnału. Napięcie to jest podawane na przetwornik analogowo – cyfrowy i dalej na wskaźnik cyfrowy wyskalowany w jednostkach mocy.

Przyrządy zbudowane w ten sposób oprócz mocy czynnej mogą mierzyć: moc bierną, pozorną, napięcie, natężenie prądu oraz $\cos\varphi$, np. miernik mocy HM8115-2 firmy HAMEG.

Przykładowe parametry metrologiczne:

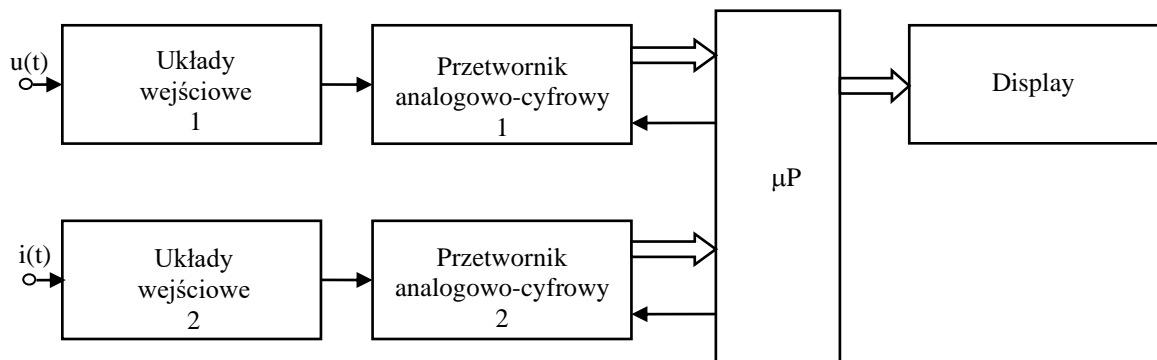
- mierzone wielkości: P, Q, S, U, I, $\cos\varphi$,
- zakres mierzonych wartości mocy czynnej: od mW do 8 kW,
- zakres częstotliwości: od dc do 1 kHz,
- dokładność: $\pm [0,5\% \text{ w.w.} + 10 \text{ cyfr}]$.

4) **Watomierz m.cz. z układem mnożącym cyfrowym.**

Innym rodzajem watomierza cyfrowego jest watomierz mikroprocesorowy, którego uproszczony schemat funkcjonalny przedstawiono na rys. 5.7.

Sygnały prądowy i napięciowy są przetwarzane w przetwornikach analogowo – cyfrowych na sygnały cyfrowe i podawane następnie do mikroprocesora. W mikroprocesorze wykonywane jest mnożenie tych sygnałów metodą cyfrową.

² Może to być mnożenie bezpośrednie lub pośrednie.



Rys. 5.7. Watomierz mikroprocesorowy

Przykładem jest wielofunkcyjny miernik mocy typ DW6090 firmy Lutron.

Przykładowe parametry metrologiczne:

- mierzone wielkości: P, S, U, I, $\cos\varphi$, energia, f,
- zakres mierzonych wartości mocy czynnej: od 1 W do 10 kW,
- zakres częstotliwości: 40 Hz ÷ 400 Hz,
- dokładność: $\pm [1,5\% \text{ w.w.} + 1 \text{ cyfra}]$.

5) Watomierz termoelektryczny

Watomierze termoelektryczne stosuje się do pomiaru małych, średnich i dużych mocy najczęściej w zakresie b.w.cz. oraz mikrofalowym. Uproszczony schemat takiego watomierza przedstawiono na rys. 5.8.



Rys. 5.8. Cyfrowy watomierz termoelektryczny

Podstawowym elementem watomierza jest przetwornik termoelektryczny (czujnik). Przetwarza on energię mikrofalową na ciepło. Ciepło to powoduje wzrost temperatury, która oddziałując na termoelement, generuje na jego wyjściu napięcie stałe o wartości zależnej od mocy wejściowej. Na wyjściu przetwornika znajduje się wzmacniacz pomiarowy³ oraz woltomierz cyfrowy wyskalowany w jednostkach mocy.

Parametry metrologiczne:

- zakres mierzonych mocy: $10^{-6} \text{ W} \div 10^2 \text{ W}$,
- zakres częstotliwości: $0 \div \sim 40 \text{ GHz}$,
- błąd dopuszczalny: $4\% \div 10\%$,
- czas ustalenia wskazań: $10 \text{ s} \div 60 \text{ s}$,

³ Wzmacniacz pomiarowy jest to specjalny wzmacniacz prądu stałego.

– współczynnik fali stojącej: $1,15 \div 1,5$.

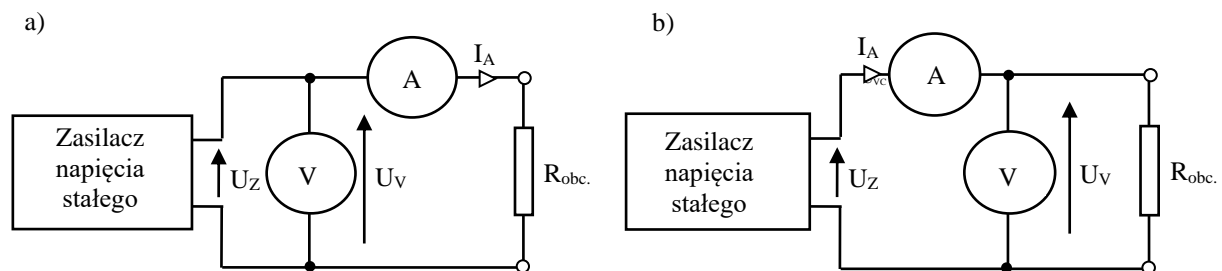
5.3.2. Metody pośrednie pomiaru mocy

Metody pośrednie pomiaru mocy oparte są na pomiarach napięcia, prądu i rezystancji a w przypadku pomiarów przy prądzie przemiennym także kąta przesunięcia fazowego między napięciem i natężeniem prądu.

Układy pomiarowe są takie same jak przy pomiarach rezystancji i impedancji metodami pośrednimi.

1) Metody techniczne

Metody te są stosowane przy pomiarach stałoprądowych.



Rys. 5.9. Pomiar mocy metodą techniczną :
a) z poprawnie mierzonym prądem,
b) z poprawnie mierzonym napięciem.

Pomiar polega na bezpośrednim pomiarze napięcia i prądu w obwodzie badanym a następnie obliczenie mocy zgodnie z zależnością matematyczną:

$$P = U_V \cdot I_A$$

Błąd podstawowy pomiaru:

$$\delta_P = \pm (\delta_{U_V} + \delta_{I_A})$$

Oznaczenia:

U_V – napięcie zmierzone woltomierzem,

I_A – natężenie prądu zmierzone amperomierzem,

δ_P – względny błąd pomiaru mocy,

δ_{U_V} – względny błąd pomiaru napięcia,

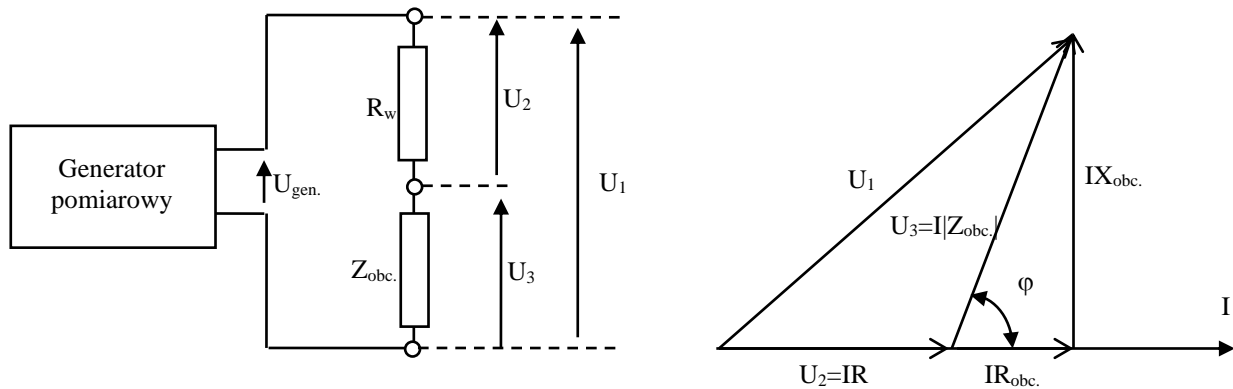
δ_{I_A} – względny błąd pomiaru prądu.

Na rys. 5.9 przedstawiono dwa sposoby włączenia amperomierza i woltomierza do obwodu badanego. Układ z poprawnie mierzonym prądem rys.9a) jest stosowany gdy $R_{obc.} \gg R_A$, natomiast układ z poprawnie mierzonym napięciem rys.9b) gdy $R_{obc.} \ll R_V$. Takie połączenia zapewniają minimalizację błędów dodatkowych.

2) Metoda trzech woltomierzy

Ten sposób pomiaru stosowany jest w zakresie m.cz. i w.cz. przy nieznanym obciążeniu Z_x .

Na rys. 5.10 przedstawiony jest układ pomiarowy oraz wykres wskazowy napięć. Zaznaczone na schemacie napięcia U_1 , U_2 , U_3 mogą być zmierzone tylko jednym woltomierzem.



Rys. 5.10. Pomiar mocy metodą trzech woltomierzy

Moc czynną wyznacza się z następującej zależności:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Ponieważ: $U = U_3$, $I = \frac{U_2}{R_w}$, $\cos \varphi = \frac{U_1^2 - U_2^2 - U_3^2}{2U_2U_3}$

To: $P = \frac{U_1^2 - U_2^2 - U_3^2}{2R_w}$

W tym układzie można również zmierzyć (metodą pośrednią) moc bierną:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi,$$

gdzie: $\sin \varphi = \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}$

Oznaczenia:

P – moc czynna,

Q – moc bierna,

R_w – rezystor wzorcowy,

$Z_{obc.}$ – impedancja obciążenia,

$\cos \varphi$ – współczynnik mocy.

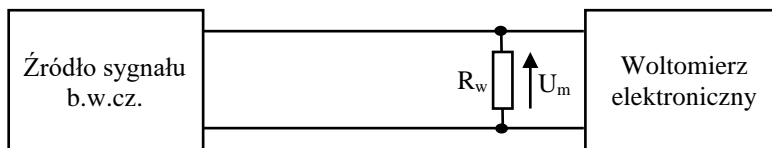
Metoda ta jest mało dokładna. Przyczyną jest to, że błąd względny różnicy liczb jest większy (lub znacznie większy) od błędów względnych tych liczb.⁴

⁴ Patrz wykład „Podstawy metrologii”.

3) Metoda woltomierza

Jeżeli obciążenie źródła jest czysto rezystancyjne oraz wartość rezystancji jest znana to moc w obciążeniu można wyznaczyć poprzez pomiar napięcia na rezystorze (rys. 5.11.).

Metoda ta jest stosowana głównie w zakresie b.w.cz.



Rys. 5.11. Pomiar mocy b.w.cz. metodą pośrednią

Rezystor wzorcowy R_w jest elementem o specjalnej konstrukcji. Opornik ten jest wbudowany w linię współosiową a jego wartość jest równa oporności falowej linii przesyłowej.

Moc oblicza się z zależności:

$$P = \frac{U_m^2}{2R_w}$$

U_m – wartość szczytowa napięcia zmierzona woltomierzem elektronicznym.

Ponieważ wartość R_w jest stała i znana, to woltomierz może być wyskalowany w jednostkach mocy⁵.

Przykładowe parametry metrologiczne:

- zakres mierzonych wartości mocy czynnej: od 1 W do 5 kW,
- zakres częstotliwości: 30 MHz ÷ 3 GHz,
- błąd dopuszczalny: 15 ÷ 30 %.

5.4. Informacje końcowe

W rozdziale tym przedstawiono podstawowe zagadnienia teoretyczne dotyczące pomiaru mocy oraz wybrane metody jej pomiaru. Podane wiadomości są potrzebne podczas wykonywania ćwiczenia laboratoryjnego.

UWAGA: Przy omawianiu różnych przyrządów do pomiaru mocy, podane zostały ich przykładowe parametry metrologiczne. Wartości tych parametrów należy rozumieć jako wartości teoretyczne i nie przypisywać ich konkretnym przyrządom.

⁵ W tym przypadku metoda może być zaliczona do metod bezpośrednich.

5.5. Badania laboratoryjne

Cel ćwiczenia:

- poznanie działania wielofunkcyjnych cyfrowych mierników mocy,
- nauczanie podstaw bezpiecznego wykonywania pomiarów przy napięciach do 230 V.

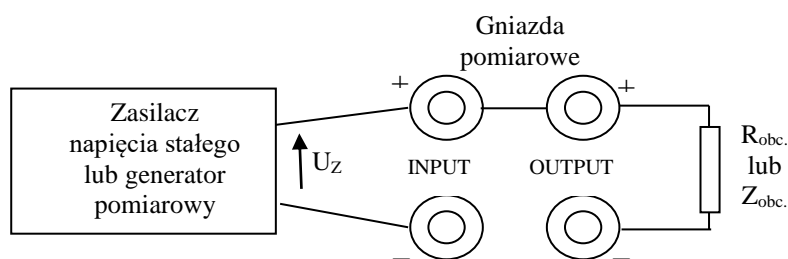
Wykaz przyrządów na stanowisku pomiarowym.

Lp.	Nazwa przyrządu
1	Watomierze cyfrowe – dwa typy.
2	Generator pomiarowy m.cz. z wyjściem mocy.
3	Generator funkcji z wyjściem mocy.
4	Zasilacz napięcia stałego.
5	Autotransformator
6	Elementy badane: – rezystor dekadowy, – badana impedancja, – żarówka.
7	Elementy dodatkowe: przewody pomiarowe.

Przebieg ćwiczenia:

1. Zastosowanie watomierza cyfrowego do pomiaru mocy w obwodach prądu stałego i przemiennego

Układ pomiarowy przedstawiono na rys. 5.12.



Rys. 5.12. Układ pomiarowy do punktu 1.

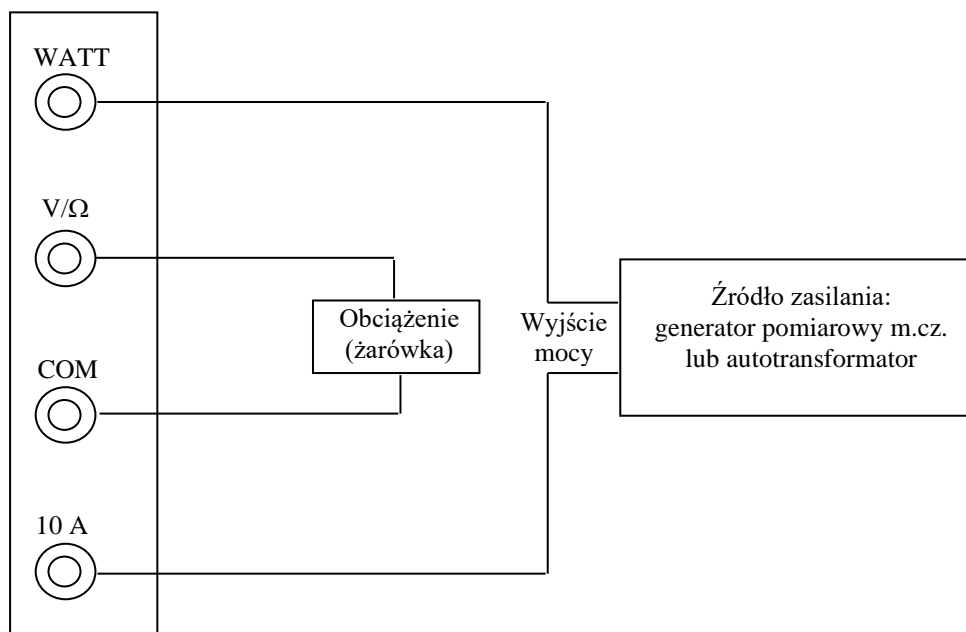
Pomiary

Badane elementy i źródła sygnałów pomiarowych połączyć zgodnie z rys. 5.12.

Wykonać pomiary dla obciążeń i parametrów sygnałów pomiarowych podanych w protokole pomiarowym. Wyniki pomiarów i obliczeń oraz wykresy zamieścić w odpowiednich tabelach.

2. Zastosowanie wielofunkcyjnego miernika mocy (cyfrowego analizatora mocy) do pomiaru mocy żarówki przy różnych częstotliwościach i napięciach zasilających na zakres częstotliwości technicznych

Na rys. 5.13 przedstawiony jest układ pomiarowy.



Rys. 5.13. Układ pomiarowy do punktu 2.

Włączyć zasilanie badanego obwodu (żarówki).

Na ekranie wyświetlane są jednocześnie wartości: mocy czynnej w [W], napięcia w [V], prądu w [A] i współczynnika mocy ($\cos\varphi$) lub częstotliwości.

Pomiary wykonać dla parametrów sygnałów pomiarowych podanych w protokole pomiarowym.

Wyniki pomiarów i obliczeń zanotować w tabeli.

Narysować odpowiednie wykresy.

Opracowanie sprawozdania:

1. Wykonać odpowiednie obliczenia. Ich wyniki zamieścić w odpowiednich tabelach.
Przedstawić przykłady przeprowadzonych obliczeń.
2. Sformułować wnioski oraz spostrzeżenia wynikające z przeprowadzonych pomiarów i obserwacji.

Przykładowe pytania kontrolne:

1. Pomiary mocy metodą techniczną z poprawnie mierzonym napięciem
2. Pomiary mocy metodą techniczną z poprawnie mierzonym prądem.
3. Pomiar mocy czynnej metodą trzech woltomierzy.

4. Pomiary mocy czynnej watomierzem elektrodynamicznym.
5. Wyjaśnić na czym polega pomiar mocy absorbowanej.
6. Wyjaśnić na czym polega pomiar mocy przepływowej.

5.6. Literatura

1. A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki: *Metrologia elektryczna*, Wyd. 10, WNT, 2010.
2. A. Jellonek, Z. Karkowski: *Miernictwo radiotechniczne*, WNT, 1972, Wyd. IV.
3. J. Mirski: *Miernictwo elektroniczne*, WKiŁ, 1973.
4. J. Parchański: *Miernictwo elektryczne i elektroniczne*, WSiP, 1991.