

Ćwiczenie 6

Pomiary czasu, częstotliwości i przesunięcia fazowego

6.1. Podstawy teoretyczne

6.1.1. Wstęp

Czas i częstotliwość są – poza napięciem – wielkościami najczęściej mierzonymi w technice, nauce i życiu codziennym. Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest nauczanie studentów mierzenia częstotliwości i okresu sygnałów elektrycznych, a także przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami, będącego skutkiem kolejności czasowej zdarzeń. Do pomiaru tych parametrów za pomocą nowoczesnych cyfrowych częstotliwościomierzy-czasomierzy oraz oscyloskopów stosowane będą metody zarówno bezpośrednie, jak i pośrednie.

6.1.2. Cyfrowy pomiar częstotliwości

Przedmiotem pomiaru będzie wielkość fizyczna zwana częstotliwością zdefiniowana następująco:

Częstotliwością f zjawiska fizycznego (procesu) okresowego nazywa się liczbę jego całkowitych powtórzeń zachodzących w jednostce czasu.

Najkrótszy przedział czasu, w którym zachodzi powtórzenie się procesu nazywany jest jego **okresem T** .

Jeśli w pewnym przedziale czasu τ (niekoniecznie jednostce) występuje n okresów T przebiegu okresowego, to częstotliwość tego przebiegu wyniesie:

$$f = \frac{n}{\tau} \quad (6.1)$$

Ponieważ $\tau = n T$, to wzór (6.1) można przepisać jako:

$$f = \frac{n}{\tau} = \frac{n}{nT} = \frac{1}{T} \quad (6.2)$$

Wzór powyższy wyraża fundamentalny związek pomiędzy częstotliwością przebiegu okresowego, a jego okresem.

Jednostką częstotliwości jest **herc**:

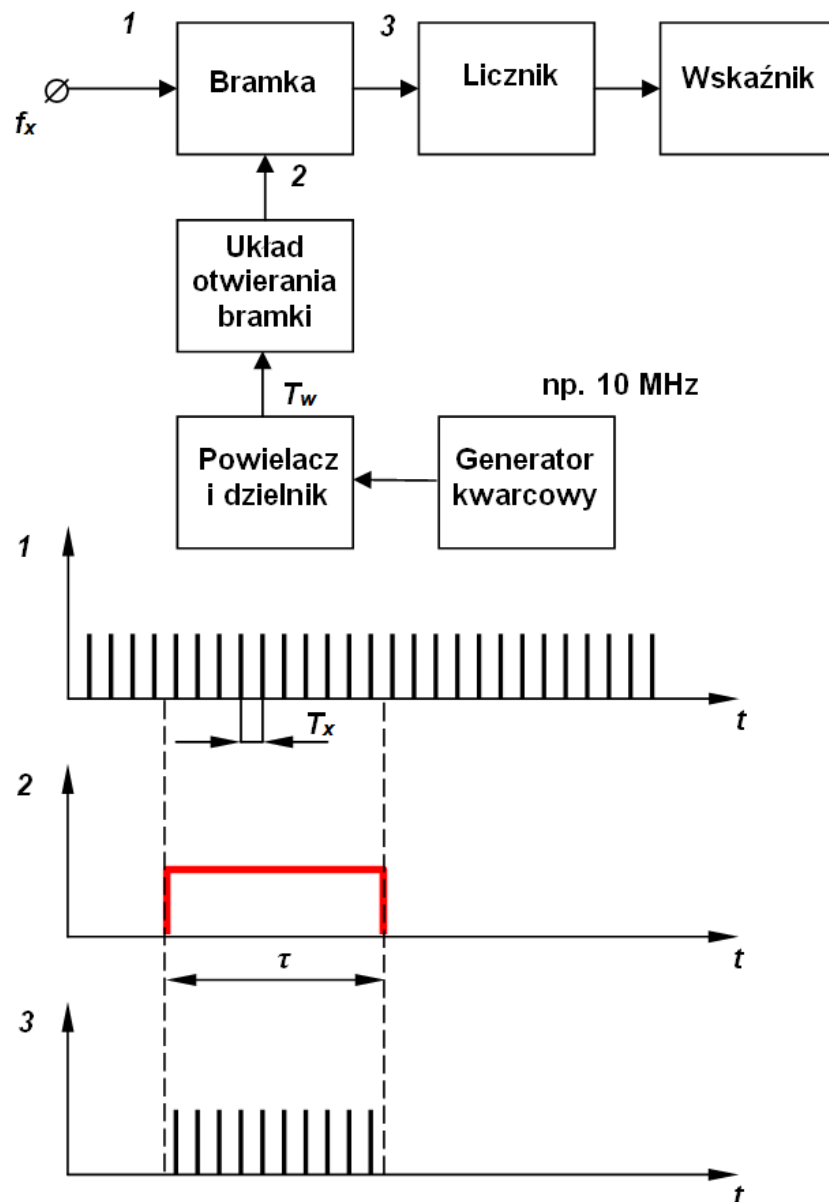
$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{\text{s}}$$

Przykład:

Stwierdzenie, że jakiś przebieg ma częstotliwość 50 herców oznacza, że w ciągu 1 sekundy wystąpiło 50 okresów w przebiegu.

6.1.3. Pomiar częstotliwości częstościomierzem cyfrowym

Zasadą pomiaru jest zliczanie liczby n impulsów pojawiających się w przedziale czasu τ . Impulsy zliczane formowane są z przebiegu mierzonego w taki sposób, aby jednemu okresowi odpowiadał jeden impuls.



Rys. 6.1. Schemat blokowy i zasada działania częstościomierza cyfrowego

Ograniczeniem od dołu częstotliwości jest błąd dyskretyzacji, natomiast od góry – górna częstotliwość licznika.

Czas zliczania τ dobierany jest arbitralnie przez prowadzącego pomiar, ze zbioru, będącego wielokrotnością lub podwielokrotnością 1 sekundy. Zbiór ten ma postać: $10^k s$, gdzie $k = -8 \div 1$ i jest liczbą całkowitą. Czas zliczania τ jest okresem T_w lub całkowitą wielokrotnością okresu przebiegu wzorcowego, generowanego przez generator wzorcowy (przeważnie kwarcowy), będący jednym z modułów częstotściomierza. Na rysunku 6.1 przedstawiony jest schemat blokowy typowego częstotściomierza cyfrowego i przebiegi napięć w poszczególnych jego punktach.

Opis działania:

Układ wejściowy (nie pokazany na schemacie) formuje z mierzonego sygnału wejściowego standardowy przebieg o częstotliwości f_x równej częstotliwości sygnału mierzonego (punkt 1 na schemacie i wykres 1). Sygnał ten doprowadzony jest do jednego z wejść bramki logicznej typu AND. Do drugiego z wejść bramki doprowadzony jest sygnał z układu otwierania bramki, mający postać impulsu prostokątnego o czasie trwania τ (punkt 2 na schemacie i wykres 2). Impuls ten formowany jest z przebiegu generatora wzorcowego, a czas jego trwania jest wielokrotnością okresu: $\tau = lT_w$. Jest oczywiste, że musi być spełniona nierówność $\tau > T_x$ (T_x – okres sygnału impulsowego). Tak więc bramka, otwarta przez czas τ przepuszcza uformowany sygnał wejściowy o częstotliwości f_x do licznika, a licznik **je** zlicza. Po czasie τ bramka zostaje zamknięta i sygnały z wejścia nie docierają do licznika. W czasie τ licznik zdąży więc zliczyć n impulsów (punkt 3 na schemacie i wykres 6.3). Związek pomiędzy liczbą zliczonych impulsów, a mierzoną częstotliwością jest następujący:

$$n = \frac{\tau}{T_x} = \frac{lT_w}{T_x} = lT_w f_x \quad (6.3)$$

Stąd wartość nieznanej częstotliwości wynosi:

$$f_x = \frac{n}{lT_w} \quad (6.4)$$

Mierzona częstotliwość jest więc proporcjonalna do liczby zliczeń.

Przykład:

Ustawiliśmy bramkę czasową (czas zliczania) na $\tau = 10 s$. Licznik zliczył 1000 impulsów. Częstotliwość mierzona wynosi więc:

$$f_x = \frac{n}{\tau} = \frac{1000}{10 s} = 100 Hz$$

Uwaga:

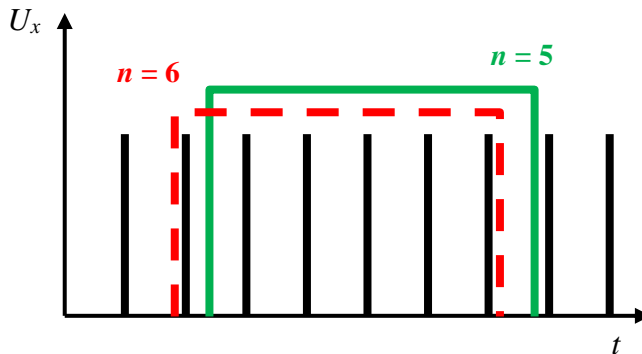
Nowoczesny częstotściomierz wyświetli nam gotowy wynik wraz z symbolem jednostki i nic sami nie musimy przeliczać.

Błąd graniczny względny pomiaru częstotliwości, obliczony metodą różniczki zupełnej wynosi:

$$\delta_g f_x = \delta_g T_w + \delta_g n \quad (6.5)$$

Błąd ten zależy od dokładności generatora wzorcowego $\delta_g T_w$, oraz od błędu zliczania impulsów $\delta_g n$ układu bramkującego. Powstawanie błędu zliczania powodowane jest brakiem synchronizacji pomiędzy impulsem bramkującym, a impulsami zliczanymi.

Ilustruje to rys. 6.2.



Rys. 6.2. Ilustracja błędu zliczania. Widać, że zależnie od położenia bramki względem zliczanych impulsów licznik zliczy ich albo 5, albo 6

Z rysunku 6.2 widać, że błąd zliczania Δn (bezwzględny) wynosi co najwyżej 1 impuls. Tak więc względny błąd zliczania wynosi:

$$\delta_g n = \frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} = \frac{1}{l T_w f_x} \quad (6.6)$$

i jest tym mniejszy, im dłuższy jest czas pomiaru $\tau = l T_w$, gdyż wtedy licznik zliczy więcej impulsów n .

Ze wzoru (6) wynika również, że pomiary małej częstotliwości f_x są mało dokładne, gdyż wtedy n jest małe, a tym samym $1/n$ jest duże. Sposobem na ominięcie tego problemu jest wykonanie pomiaru pośredniego: zmierzenie okresu i skorzystanie ze wzoru (2). Błąd takiego pośredniego pomiaru częstotliwości jest równy błędowi pomiaru okresu (równanie (11)).

6.1.4. Pomiary okresu częstotściomierzem–czasomierzem

Z uwagi na zależność (1) wiążącą czas i częstotliwość oraz stosowanie tej samej metody pomiarowej czas mierzony jest częstotściomierzem cyfrowym i z tego powodu częstotściomierze

często nazywane są częstotściomierzami-czasomierzami. Podstawową wielkością związaną z czasem jest w miernictwie elektronicznym **okres** przebiegu.

Zgodnie ze słownikiem fizycznym:

***Okresem T** nazywamy czas pomiędzy dwiema fazami drgań oscylacyjnych (elektrycznych, mechanicznych itd.) różniącymi się o 2π . Jednostką okresu jest sekunda s .*

Pomiar okresu odbywa się poprzez zliczanie impulsów o wzorcowym i znanym okresie powtarzania T_w w trakcie trwania okresu przebiegu mierzonego.

Metoda pomiarowa jest więc taka sama, jak stosowana w pomiarze częstotliwości, ale odmienny jest sposób formowania impulsów zliczanych i bramki czasowej. Zliczane są mianowicie impulsy o częstotliwości wzorcowej, generowane przez generator wzorcowy w trakcie trwania bramki czasowej, formowanej z jednego, lub kilku okresów przebiegu mierzonego.

Na rys. 6.1a przedstawiony jest schemat blokowy typowego częstotściomierza – czasomierza cyfrowego, ustawionego do pomiaru okresu i przebiegi napięć w poszczególnych jego punktach.

Z rysunku widać, że mierzony okres wyraża się wzorem:

$$T_x = nT_w \quad (6.7)$$

Podobnie jak uprzednio, T_w dobierane jest ze zbioru $10^k s$, gdzie $k = -8 \div 1$.

Opis działania:

Do jednego z wejść bramki AND doprowadzony jest sygnał o częstotliwości f_w (okresie T_w), formowany z przebiegu wzorcowego (punkt 1 na schemacie i wykres 1). Do drugiego wejścia bramki doprowadzony jest sygnał uformowany z przebiegu mierzonego o okresie T_x , stanowiący bramkę czasową, w czasie której licznik będzie zliczał impulsy o częstotliwości wzorcowej f_w (punkt 2 na schemacie i wykres 2). Jest oczywiste, że musi być spełniona nierówność $\tau > T_w$.

Tak więc bramka, otwarta przez czas τ przepuszcza sygnały wejściowe o częstotliwości f_w , a licznik je zlicza. Po czasie τ bramka zostaje zamknięta i sygnały z wejścia nie docierają do licznika. W czasie τ licznik zdąży więc zliczyć n impulsów (punkt 3 na schemacie i wykres 3). Związek pomiędzy liczbą zliczonych impulsów n , a mierzonym okresem T_x jest następujący:

$$n = \frac{\tau}{T_w} = \frac{l T_x}{T_w} \quad (6.8)$$

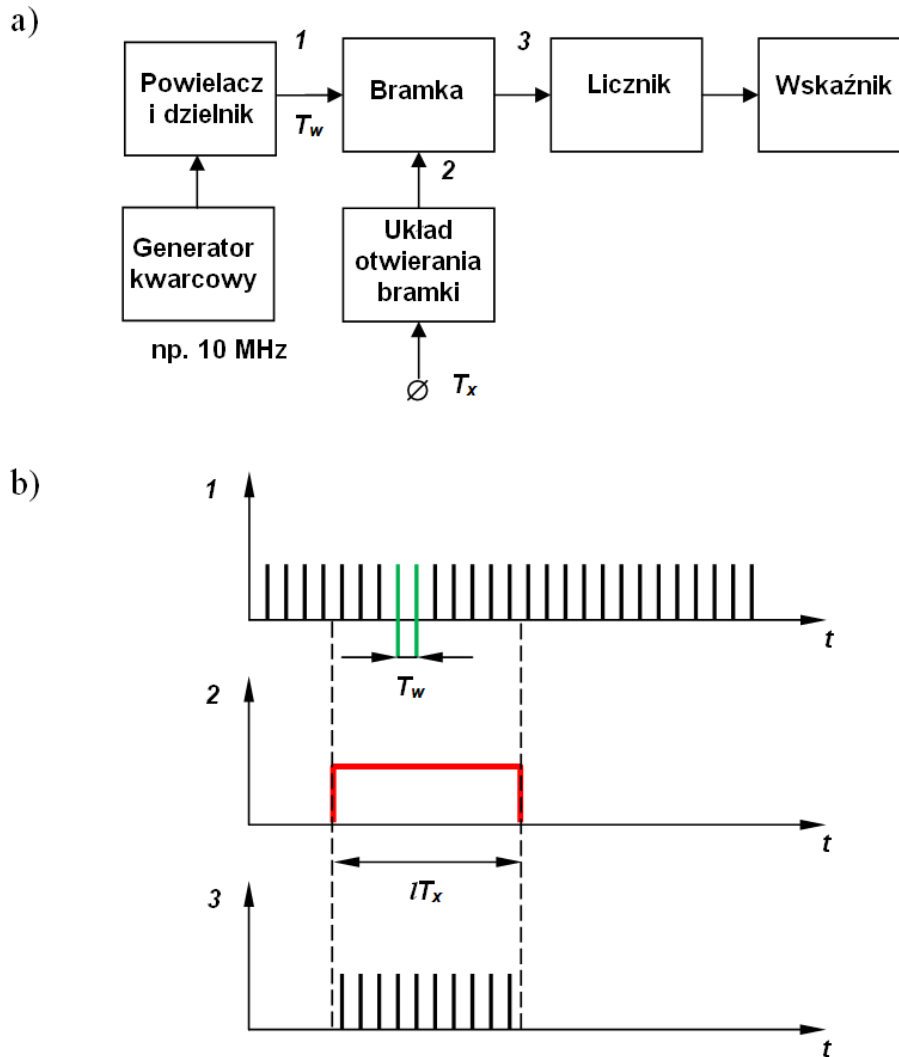
Stąd mierzony okres wynosi:

$$T_x = \frac{n}{l} T_w = \frac{n}{l f_w} \quad (6.9)$$

i jest proporcjonalny do liczby zliczeń.

Błąd graniczny względny pomiaru okresu, wyliczony metodą różniczki zupełnej z równania (6.9) wynosi:

$$\delta_g T_x = \delta_g T_w + \delta_g n \quad (6.10)$$



Rys. 6.3. Schemat blokowy częstotściomierza – czasomierza (a); przebiegi czasowe (b)

Zależy on od dokładności generatora wzorcowego $\delta_g T_w$ oraz błędu zliczania $\delta_g n$. Wpływ na błąd ma również fakt, że impuls bramkujący formowany jest z przebiegu mierzonego, często zakłóconego. Powoduje to wystąpienie dodatkowego błędu bramkowania δ_B . Tak więc całkowity błąd pomiaru okresu wyniesie:

$$\delta_g T_x = \delta_g T_w + \delta_g n + \delta_B \quad (6.11)$$

Przykład:

Wybraliśmy częstotliwość wzorcową f_w (częstotliwość zliczanych impulsów) na $f_w = 1$ MHz. Licznik zliczył 1000 impulsów. przy założeniu $l = 1$, mierzony okres wynosi więc:

$$T_x = \frac{n}{f_w} = \frac{10^3}{10^6} = 10^{-3} \text{ s} = 1 \text{ ms}$$

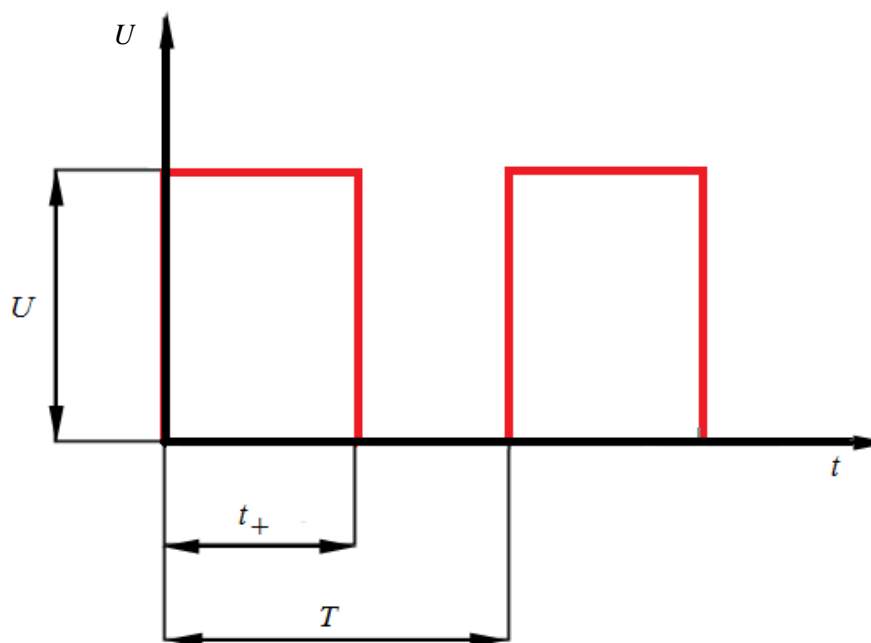
Uwaga:

Częstościomierz wyświetli nam gotowy wynik wraz z symbolem jednostki i nic sami nie musimy przeliczać.

6.1.5. Pomiar przedziałów czasu

Nowoczesny częstościomierz-czasomierz umożliwia pomiar przedziałów czasu. Wybierając z menu przyrządu funkcję A→B i doprowadzając jeden sygnał do WE1, a drugi do WE2, możemy zmierzyć czas opóźnienia między tymi sygnałami.

Jeśli do obu wejść doprowadzimy ten sam sygnał, to możemy pomierzyć jego parametry czasowe.



Rys. 6.4. Pomiar okresu i czasu trwania impulsu

Przykład:

Do wejść 1 i 2 doprowadzamy sygnał prostokątny o kształcie, jak na rys. 6.4. Wybierając zbocze narastające sygnału jako otwierającą bramkę czasową, a zbocze opadające jako zamykającą bramkę czasową otrzymamy czas trwania części dodatniej impulsu. Wybierając inne kombinacje zamykania i otwierania bramki wyznaczymy inne, odpowiednie parametry czasowe sygnału.

6.1.6. Metody oscyloskopowe pomiaru czasu, częstotliwości i fazy

6.1.6.1. Pomiar okresu za pomocą oscyloskopu

Wygodną, choć mało dokładną metodą pomiaru okresu jest metoda oscyloskopowa. Należy doprowadzić sygnał do wejścia i uzyskać stabilny, możliwie duży obraz na jego ekranie. Następnie należy zmierzyć odległość L pomiędzy dwoma charakterystycznym punktami oscylogramu, odległymi od siebie o jeden okres i wyrazić tę odległość w działkach dz .

Okres obliczyć można ze wzoru:

$$T = L [dz] \cdot D_t \left[\frac{s}{dz} \right] \quad (6.12)$$

gdzie D_t jest ustawioną wartością współczynnika czasu.

Dokładność pomiaru okresu tą metodą nie jest duża, a uwarunkowana głównie dokładnością wyznaczenia L . Na ogół jest rzędu kilku procent i wyraża się wzorem:

$$\delta_T = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta D_t}{D_t} \quad (6.13)$$

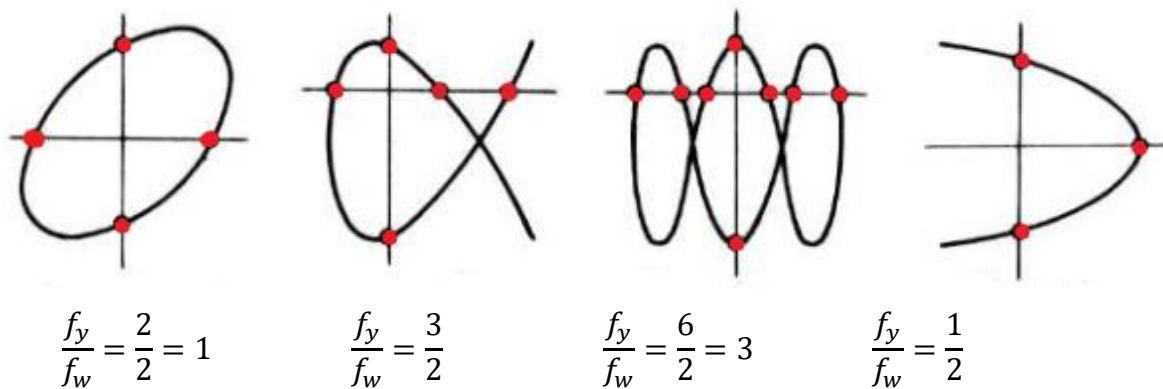
6.1.6.2. Pomiar częstotliwości z wykorzystaniem figur Lissajous

Ta dość dokładna metoda należy do metod porównawczych i stosowana jest dla sygnałów harmonicznym. Pomiar tą metodą polega na bezpośrednim porównaniu sygnału, którego częstotliwość f_x chcemy zmierzyć z sygnałem wzorcowym o częstotliwości f_w . Obydwa sygnały doprowadzamy do wejść oscyloskopu, pracującego w trybie X–Y. Na ekranie otrzymamy ruchome obrazy – tzw. figury Lissajous [czyt. lisażu]. Ogólnie można stwierdzić, że są one dość skomplikowane i trudne do interpretacji. Zrównanie obu częstotliwości poprzez dostrojenie generatora wzorcowego spowoduje, że obraz przestanie być ruchomy i przyjmie prosty oraz łatwy do interpretacji kształt. Ustabilizowanie się figur zachodzi nie tylko dla równych częstotliwości, ale też dla takich, których stosunki są ilorazami liczb całkowitych, przy czym kształty figur są różne.

Stosunek częstotliwości określa się na podstawie ilości przecięć n_x oraz n_y figury z prostymi, równoległymi do osi X oraz Y, ale poprowadzonymi nie przez punkty osobiwe tych figur.

Przykład:

Do kanału odchyłania Y podłączamy sygnał o nieznannej częstotliwości f_y , zaś do kanału X podłączamy sygnał z generatora wzorcowego f_w . Rysunek 6.5 ilustruje sposób obliczania częstotliwości metodą figur Lissajous.



Rys. 6.5. Obliczanie stosunku częstotliwości metodą figur Lissajous

Dokładność pomiarów jest równa dokładności generatora wzorcowego:

$$\delta_g f_x = \delta_g f_w \quad (6.14)$$

6.1.6.3. Pomiar kąta przesunięcia fazowego

Kąt fazowy (faza) jest parametrem określającym porządek obserwacji przebiegu okresowego przez odniesienie do jego okresu, wyrażonego w mierze kątowej. Fazą przebiegu harmonicznego:

$$x(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi) = X_m \sin \Phi \quad (6.15)$$

jest argument sinusa, czyli kąt Φ .

Przesunięciem fazowym dwóch przebiegów harmonicznym o tej samej częstotliwości:

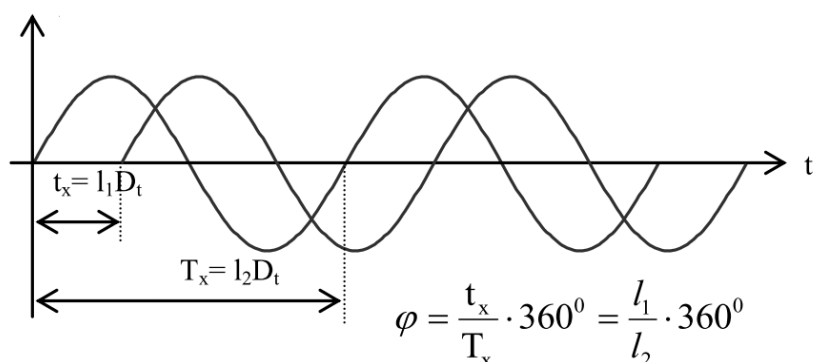
$$x_1(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (6.16)$$

$$x_2(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi_2) \quad (6.17)$$

będzie różnica ich faz:

$$\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (6.18)$$

Sytuację tę przedstawia rys. 6.6.



Rys. 6.6. Pomiar kąta przesunięcia fazowego.

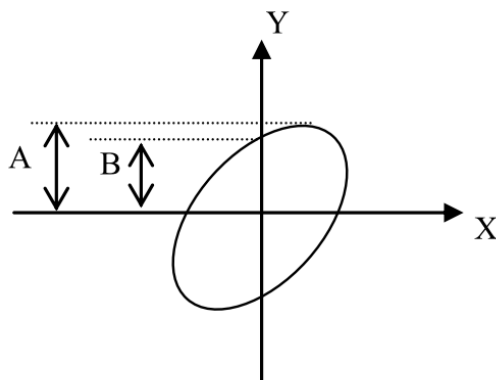
6.1.6.4. Pomiar przesunięcia fazowego za pomocą oscyloskopu z wykorzystaniem rozciągu liniowego

Najłatwiej dokonać pomiaru za pomocą oscyloskopu dwukanałowego, podłączając sygnały odpowiednio do wejść WE1 i WE2 i doprowadzając obraz do postaci, jak na rysunku 6.6. Mierząc długość odcinków l_1 oraz l_2 , gdzie l_1 odpowiada różnicy faz, zaś l_2 okresowi, przesunięcie fazowe wyliczyć można ze wzoru:

$$\varphi = 2\pi \frac{l_1}{l_2} \quad (6.19)$$

6.1.6.5. Pomiar przesunięcia fazowego za pomocą oscyloskopu z wykorzystaniem rozciągu X–Y

Metoda ta czasami nazywana jest metodą elipsy. Po doprowadzeniu mierzonych sygnałów do wejść oscyloskopu dwukanałowego, pracującego w trybie X–Y na ekranie pojawi się elipsa (dla sygnałów sinusoidalnych tej samej częstotliwości) o parametrach, jak na rysunku 6.7.



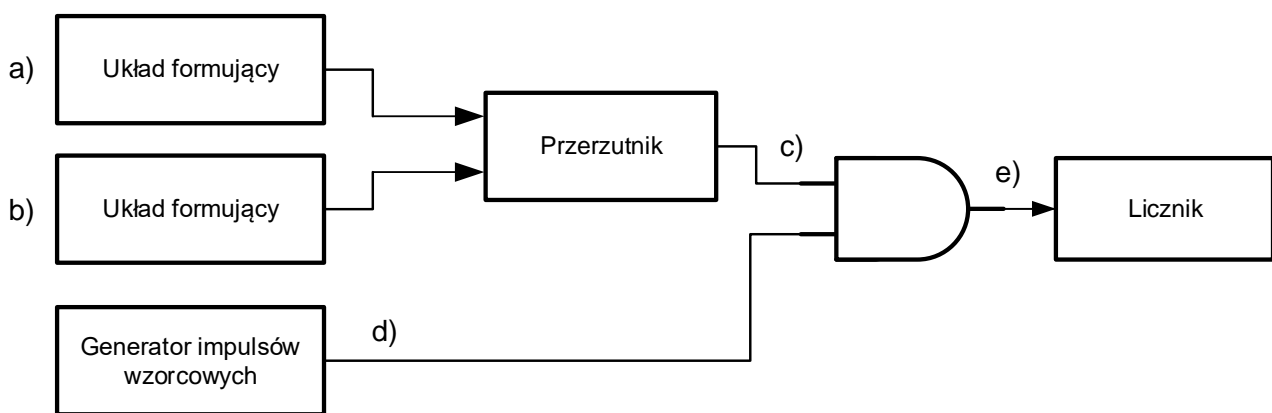
Rys. 6.7. Pomiar kąta przesunięcia fazowego metodą rozciągu X–Y

Kąt przesunięcia fazowego wyrażony jest wzorem:

$$\varphi = \pm \arcsin\left(\frac{B}{A}\right) \quad (6.20)$$

6.1.7. Pomiar przesunięcia fazowego fazomierzem cyfrowym

Cyfrowy pomiar przesunięcia fazowego dwóch sygnałów harmoniczych oparty jest na opisanej uprzednio w punkcie 6.2 metodzie cyfrowego pomiaru odcinków czasu. Uproszczony schemat blokowy przedstawiony jest na rys. 6.8.



Rys. 6.8. Uproszczony schemat blokowy fazomierza przerzutnikowego

Opis działania:

Na wejścia układów formujących podawane są sygnały, których przesunięcie fazowe jest przedmiotem pomiaru. Układy przekształcają sygnały sinusoidalne na fale prostokątne z zachowaniem okresu. Fale prostokątne są następnie różniczkowane, a pochodne ujemne są obcinane. Pochodne dodatnie sterują bramką AND, która zlicza impulsy wzorcowe: układ sterujący (niepokazany na schemacie) powoduje naprzemienny pomiar okresu T_x sygnału i odcinka czasu proporcjonalnego do przesunięcia fazowego t_x .

Związek pomiędzy liczbą zliczeń n a okresem T_x jest następujący:

$$T_x = n_1 T_w \quad (6.21)$$

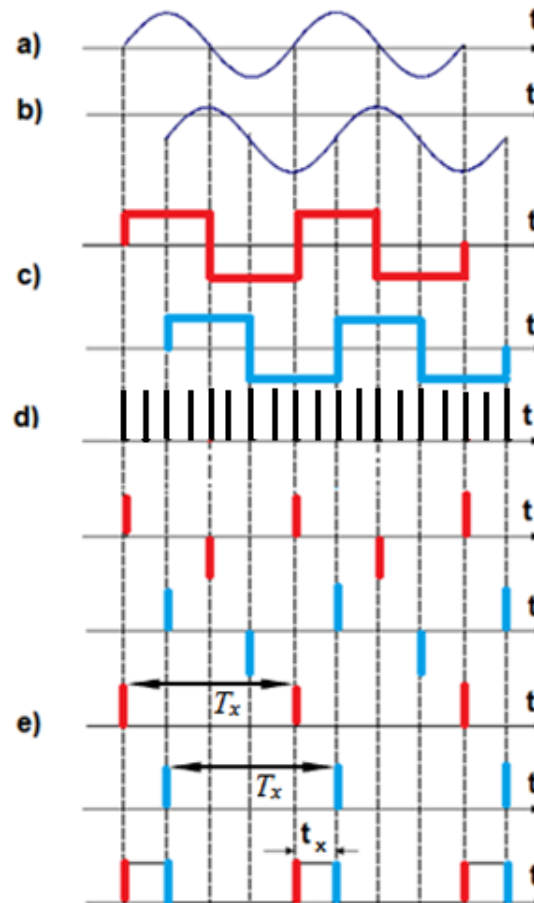
Podobnie

$$t_x = n_2 T_w \quad (6.22)$$

Korzystając z definicji przesunięcia fazowego można napisać:

$$\varphi_x = \frac{t_x}{T_x} 2\pi = \frac{n_2}{n_1} 2\pi \quad (6.23)$$

Na błędy pomiaru wpływ mają te same czynniki, co przy pomiarze czasu. Rysunek 6.9 pokazuje istotne przebiegi czasowe w głównych punktach układu.

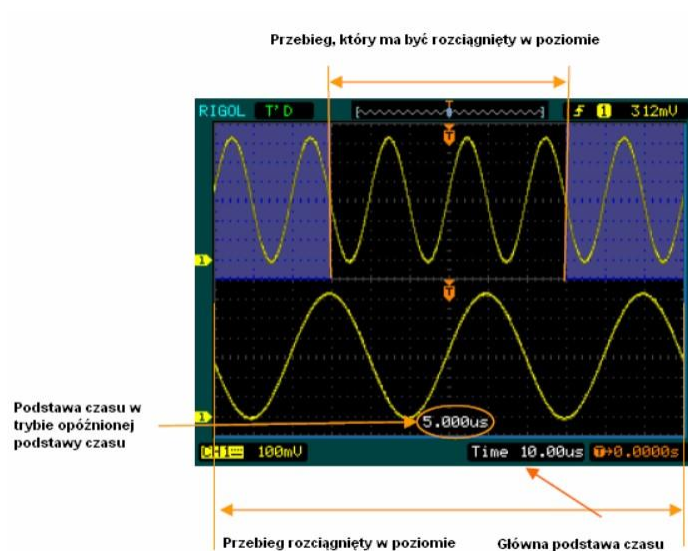


Rys. 6.9. Przebiegi czasowe fazomierza przerzutnikowego

PONIŻEJ

Dodatkowo – możliwość dokładniejszych pomiarów z wykorzystaniem możliwości oscyloskopu cyfrowego

Przykład możliwości – opóźniona podstawa czasu



6.2. Badania laboratoryjne

Cel ćwiczenia:

- poznanie metod pomiaru podstawowych parametrów czasowych sygnałów;
- nabycie umiejętności posługiwania się nowoczesnymi typami częstotściomierzy–czasomierzy cyfrowych.

Wykaz przyrządów na stanowisku pomiarowym

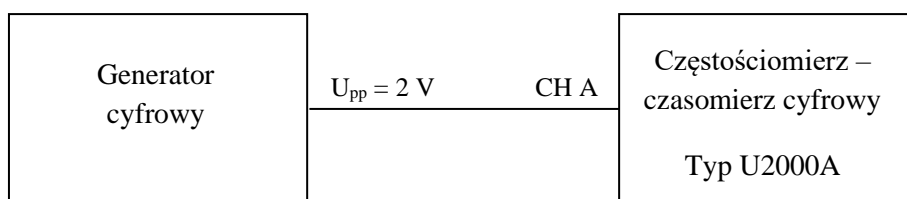
Lp.	Nazwa przyrządu
1	Częstotściomierz cyfrowy nr 1
2	Częstotściomierz cyfrowy nr 2
3	Generator funkcji – źródło sygnałów pomiarowych zmiennoprądowych
4	Generator RC

5	Oscyloskop analogowy
6	Elementy dodatkowe: przesuwniki fazy, przewody pomiarowe, rozdzielacze sygnałów.

Przebieg ćwiczenia:

1. Cyfrowy pomiar częstotliwości

W układzie pomiarowym, jak poniżej należy zmierzyć, używając kolejno dwóch typów częstotściomierzy, kilka częstotliwości sygnału sinusoidalnego.

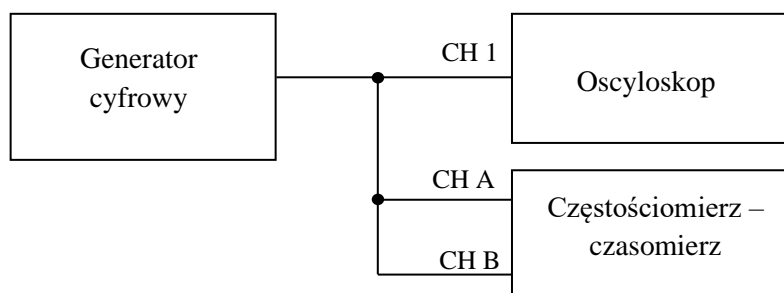


Rys. 6.10. Układ do cyfrowego pomiaru częstotliwości

Częstotliwość badanego sygnału zmierzyć metodą:

- bezpośrednią przy różnych czasach otwarcia bramki t_B ;
- pośrednią (poprzez pomiar okresu) przy pomiarze 1-go okresu i 10-ciu okresów.

2. Pomiar przedziałów czasu



Rys. 6.11. Układ do pomiaru przedziałów czasu

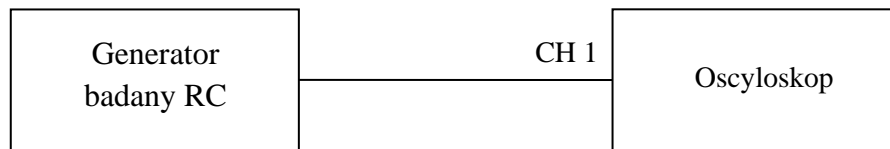
Na generatorze ustawiać kolejno przebiegi impulsowe o zadanych czasach trwania impulsu.

Zmierzyć czas trwania impulsów metodą oscyloskopową i cyfrową.

Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli.

3. Metody oscyloskopowe pomiaru czasu i częstotliwości

Metoda pośrednia (pomiar okresu)



Rys. 6.12. Układ do pomiaru okresu

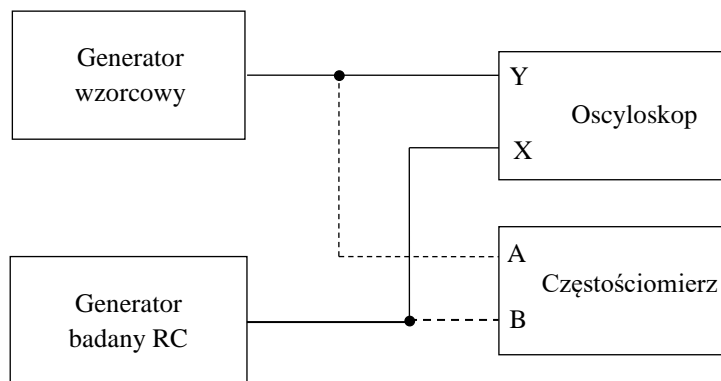
Na generatorze badanym ustawić częstotliwość o wartości podanej przez prowadzącego.

Zmierzyć częstotliwość sygnału metodą pośrednią poprzez pomiar okresu.

Pomiar przeprowadzić dla trzech oscylogramów (liczba pełnych cykli badanego sygnału widoczna na ekranie oscyloskopu: $n = 1$, $n = 2$ oraz $n = 5$).

Uwaga: regulator płynnej regulacji współczynnika czasu należy ustawić w prawe skrajne położenie (kalibracja).

Metoda porównawcza (figur Lissajous)



Rys. 6.13. Układ do pomiaru częstotliwości metodą figur Lissajous

Przełączyć oscyloskop na pracę X – Y.

Na generatorze badanym RC ustawić częstotliwość np. 6 kHz.

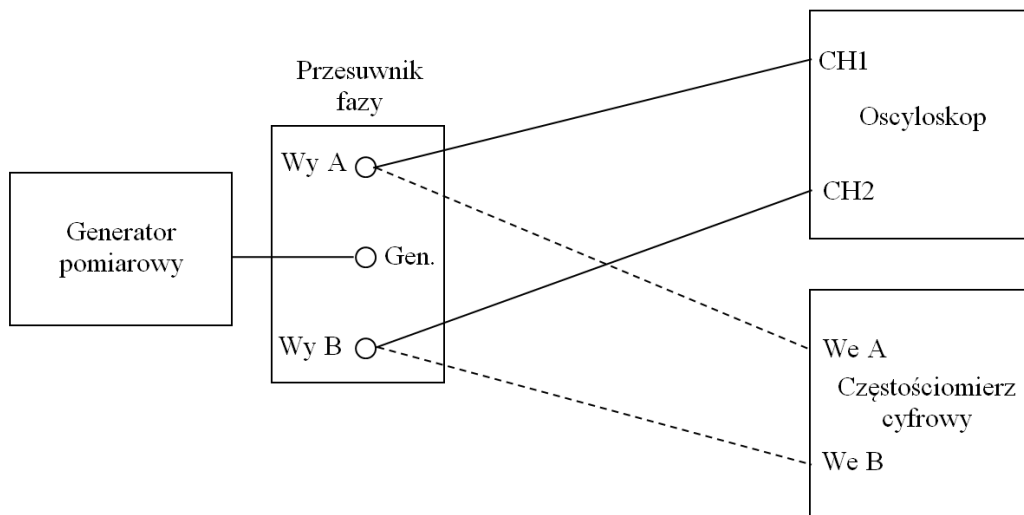
Na wejście Y oscyloskopu podać sygnał o częstotliwości wzorcowej f_w .

Regulując częstotliwością generatora wzorcowego, ustawić na ekranie figury Lissajous odpowiednie dla zadanych w tabeli stosunków częstotliwości f_w/f_x .

Naszkicować oscylogramy i obliczyć częstotliwość f_x .

Wyniki zamieścić w tabeli.

4. Pomiar kąta przesunięcia fazowego

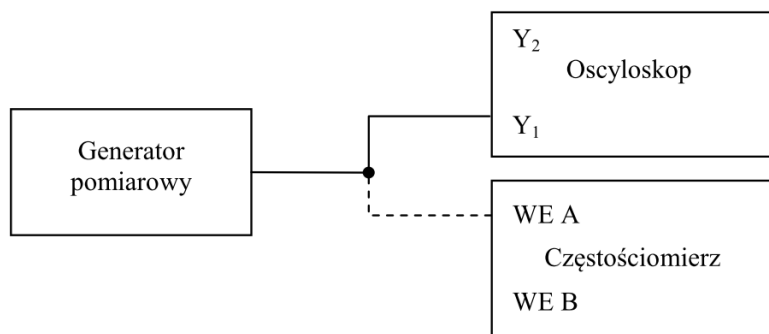


Rys. 6.14. Układ do pomiaru kąta przesunięcia fazowego

Zmierzyć kąt przesunięcia fazowego dla kilku częstotliwości podanych przez prowadzącego. Pomiar przeprowadzić metodą oscyloskopu dwukanałowego, metodą figur Lissajous oraz częstościomierzem – czasomierzem cyfrowym. Przy pomiarze metodą figur Lissajous oscyloskop przełączyć na pracę X–Y.

Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli.

5. Pomiar współczynnika wypełnienia D



Rys. 6.15. Układ do pomiaru współczynnika wypełnienia D

Dla stałej częstotliwości f_{gen} sygnału prostokątnego i różnych współczynników wypełnienia nastawianych na generatorze dokonać pomiaru za pomocą oscyloskopu i częstościomierza: czasu trwania impulsu, okresu i współczynnika wypełnienia.

Wyniki pomiarów przedstawić w tabeli.

Opracowanie sprawozdania:

1. Protokół pomiarowy z wypełnionymi tabelami.
2. Przykłady obliczeń do każdego punktu pomiarowego.

3. Wymagane wykresy (odpowiednio opisane).
4. Porównanie wyników pomiarów z danymi technicznymi.
5. Własne wnioski, spostrzeżenia i uwagi wynikające z przeprowadzonych pomiarów i obserwacji.

Przykładowe pytania kontrolne:

1. Częstościomierz cyfrowy: schemat blokowy, zasada pracy, dokładność, zakres.
2. Okresomierz cyfrowy: schemat blokowy, zasada pracy, dokładność, zakres.
3. Cyfrowy pomiar stosunku dwóch częstotliwości: schemat blokowy, zasada pracy, dokładność.
4. Rozszerzanie zakresu częstościomierzy cyfrowych na w.cz.: przystawka dzieląca.
5. Fazomierz cyfrowy: schemat blokowy, zasada pracy, dokładność.
6. Cyfrowy pomiar częstotliwości: analiza dokładności pomiaru.
7. Metody rozszerzania zakresu pomiarowego częstościomierzy cyfrowych na m.cz.
8. Cyfrowy pomiar czasu: schemat blokowy, zasada pracy, dokładność, zakres.
9. Cyfrowy pomiar okresu: analiza dokładności pomiaru.
10. Rozszerzanie zakresu częstościomierzy cyfrowych na w.cz.: przystawka mieszająca.
11. Analiza dokładności pomiaru częstotliwości metoda cyfrową.

6.3. Literatura

1. A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki: *Metrologia elektryczna*, Wyd. 11, WNT, 2014.
2. M. Stabrowski: *Miernictwo elektryczne: cyfrowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza PW, 1994.
3. J. Rydzewski: *Pomiary oscyloskopowe*, WNT, 2007.
4. M. Stabrowski: *Cyfrowe przyrządy pomiarowe*, PWN, 2002.