

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.****1. Cel ćwiczenia.**

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z zasadami pomiaru częstotliwości i czasu; podstawowymi parametrami typowych częstościomierzy - czasomierzy, warunkami ich użytkowania ze szczególnym uwzględnieniem dokładności pomiaru.

2. Pojęcia podstawowe.

Częstotliwość i czas należą do najczęściej mierzonych wielkości fizycznych.

Częstotliwość f_x sygnału okresowego $u(t)$ zdefiniowana jest jako liczba okresów (cykli) tego sygnału w jednostce czasu (rys.2).

$$f_x = \frac{n}{T_w} = n \cdot f_w \quad (1)$$

gdzie: n - jest liczbą okresów, T_w - jest wzorcowym czasem, w którym odbywa się zliczanie cykli . Jednostką częstotliwości jest $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$.

Okres T_x sygnału mierzonego $u(t)$ spełnia warunek :

$$u(t) = u(t + kT_x) \text{ gdzie } k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Pomiaru okresu T_x można dokonać określając liczbę elementarnych odcinków czasu n wyznaczanych przez generator wzorcowy o dokładnie znanej wzorcowej częstotliwości f_w w przedziale czasu $k \cdot T_x$ (rys. 4).

$$T_x = \frac{n}{k \cdot f_w} \quad (3)$$

Spełnienie warunku (2) następuje dla ustalonego poziomu wartości sygnału $u(t)$ nazywanego poziomem wyzwaniem (Rys.4.) W dostępnej aparaturze wartość poziomu wyzwania może być zadawana ręcznie, lub automatycznie.

Ze względu na stosowaną metodę wyróżnia się:

- pomiar analogowy częstotliwości i okresu, który jest historycznie najstarszy i najczęściej odbywa się z wykorzystaniem obserwacji za pomocą oscyloskopu, wzorcem pomiarowym jest w tym przypadku generator podstawy czasu oscyloskopu. Stosowane są także częstościomierze przetwornikowe, w których następuje przetwarzanie częstotliwości na napięcie elektryczne, wartość częstotliwości jest wyznaczana z wyniku pomiaru napięcia.
- pomiar cyfrowy.

ĆWICZENIE NR 7. Sygnały Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.

Cyfrowy pomiar częstotliwości realizuje się w praktyce dwoma sposobami:

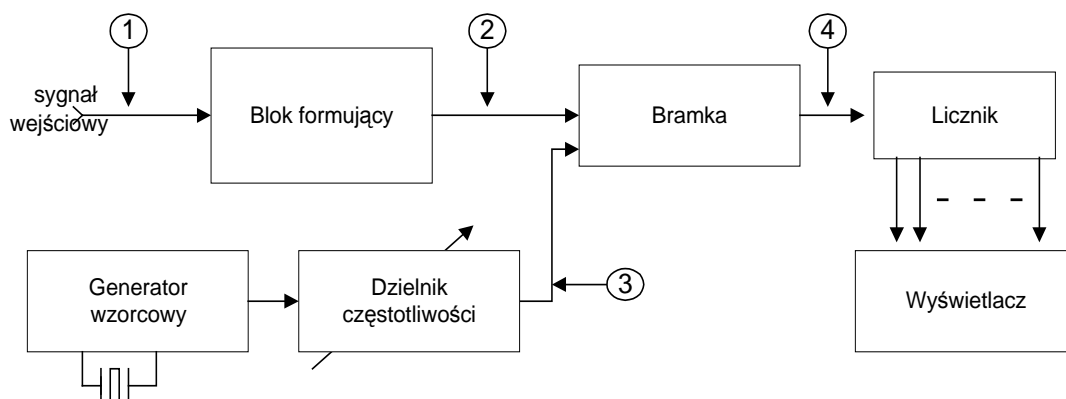
- metodą bezpośrednią poprzez zliczenie liczby okresów we wzorcowym odcinku czasu np. w ciągu 1s.
- metodą pośrednią poprzez pomiar okresu T_x mierzonego sygnału i wyznaczenie mierzonej częstotliwości jako odwrotności okresu

$$f_x = \frac{1}{T_x} \quad (4)$$

3. Struktury mierników cyfrowych do pomiaru częstotliwości i czasu.

3.1. Częstościomierz.

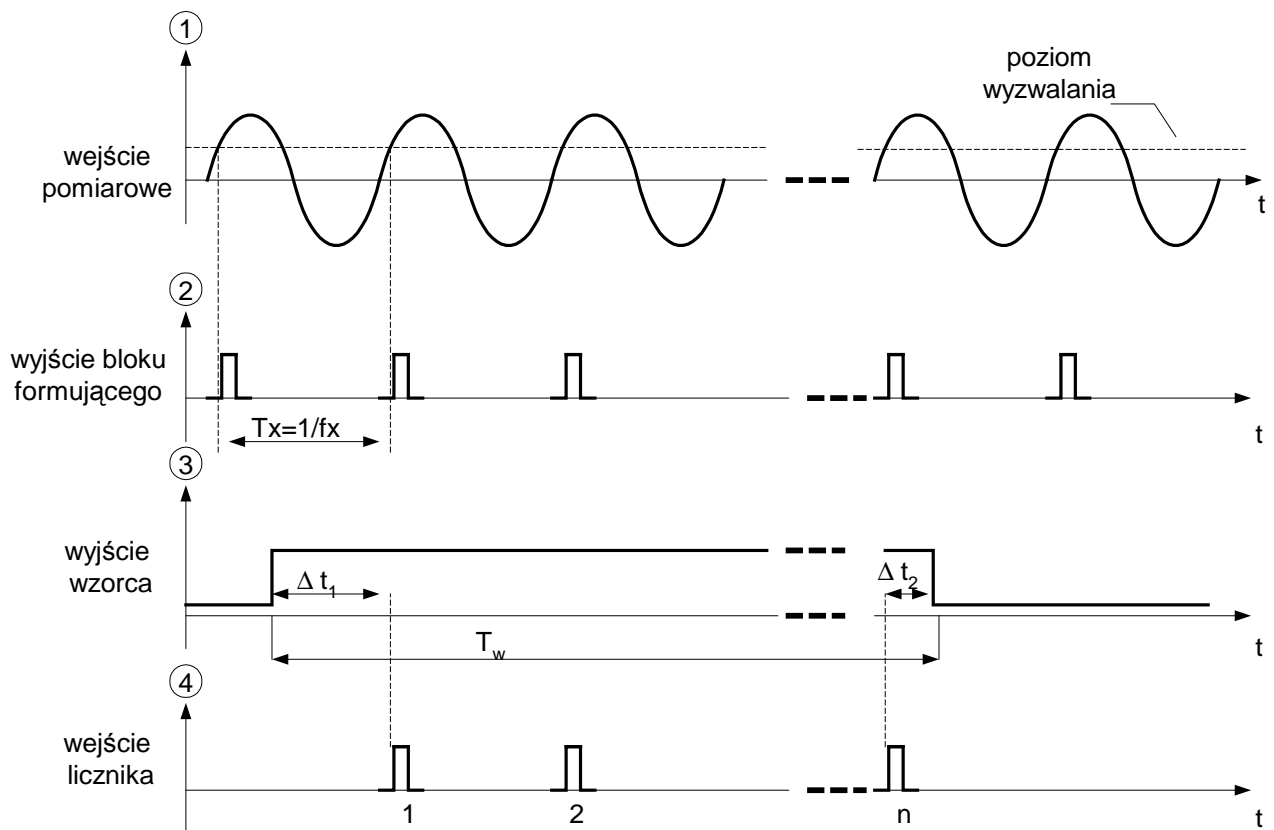
Podstawową strukturę częstościomierza cyfrowego, przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1 Podstawowa struktura częstościomierza.

Wejściowy sygnał okresowy ① o dowolnym kształcie podlega przetworzeniu w bloku formującym na ciąg impulsów prostokątnych ②, które wytwarzane są w chwilach czasowych zdeterminowanych zrównaniem amplitudy sygnału mierzonego z poziomem wyzwalania, dobieranym przez mierzącego lub ustalonym automatycznie. Liczbę impulsów przekazanych do licznika ④ wyznacza sygnał, sterujący bramką ③ o dokładnie znanym czasie trwania T_w uzyskany z generatora wzorcowego. Stopień podziału częstotliwości wzorcowej określa czas otwarcia bramki, a przez to zakres pomiarowy częstościomierza. Może on być wybierany ręcznie, bądź automatycznie (tab.2).

ĆWICZENIE NR 7. Sygnały Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.



Rys.2. Sygnały w wybranych punktach struktury częstotściomierza.

I tak, jeżeli licznik zlicza impulsy w zakresie 6 pozycji dziesiętnych (dekad) o pojemności 10^6-1 zakresy pomiarowe i najmniejsza rejestrowana zmiana wartości (rozdzielczość) przedstawiają się następująco:

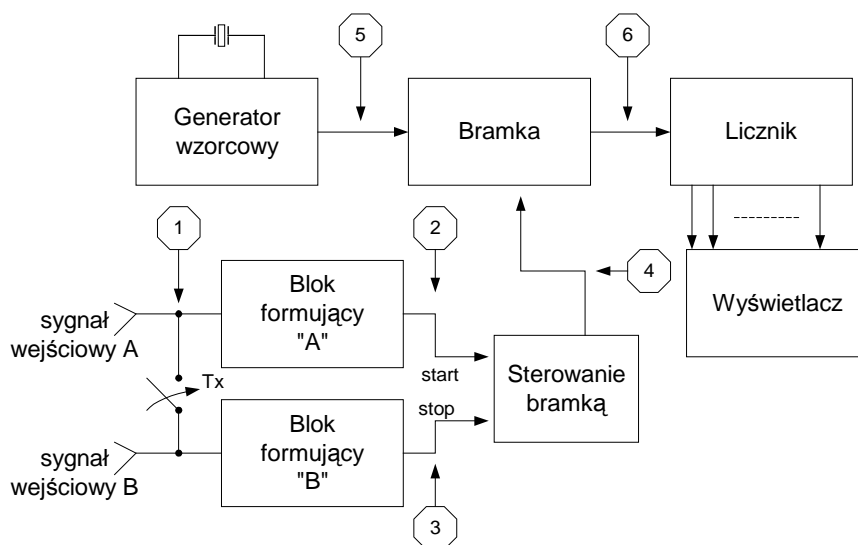
Tab. 2. Przykładowe parametry częstotściomierza zawierającego licznik 6- dekadowy.

T_w [s]	Zakres [kHz]	Rozdzielczość [Hz]
1000	1	0.001
10	100	0.1
1	1000	1
0.1	10000	10

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

3.2. Miernik odcinka czasu i okresu.

Pomiaru odcinka czasu badanego sygnału można dokonać zamieniając miejscami generator wzorcowy i źródło sygnału mierzonego oraz modyfikując sposób sterowania bramką.



Rys.3. Podstawowa struktura miernika zależności czasowych między dwoma sygnałami A i B.

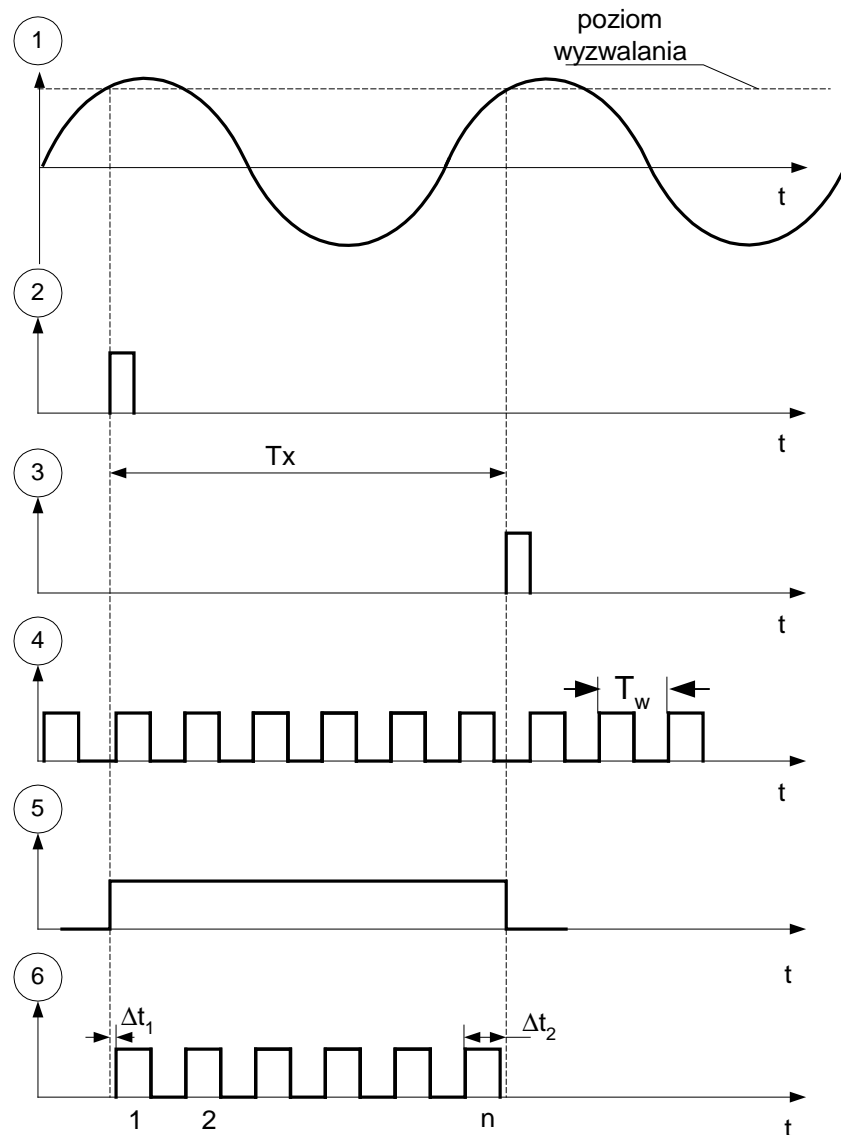
Pomiar okresu realizowany jest przy zwartym przełączniku T_x .

Ogólnie mierzony odcinek czasu T_x , wyznaczany jest sygnałami: „START” ②, otwierającym bramkę i „STOP” ③ zamykającym bramkę. Sygnały te powstały z uformowania sygnałów wejściowych odpowiednio w kanałach A i B. Stan licznika n jest równy liczbie impulsów o wzorcowej częstotliwości f_w ④ przepuszczonych przez bramkę w mierzonym odcinku czasu ⑥.

$$T_x = \frac{n}{f_w} = n \cdot T_w \quad (4)$$

Miernik odcinka czasu może być wykorzystany do pomiaru okresu sygnałów (rys. 4), w tym przypadku na oba kanały podawany jest sygnał mierzony (przełącznik T_x jest zwarty).

LABORATORIUM Z ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI
ĆWICZENIE NR 7. Sygnały Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.



Rys.4. Sygnały w wybranych punktach struktury miernika okresu.

4. Błędy w cyfrowym pomiarze częstotliwości i okresu.

4.1. Błąd dyskretyzacji.(niepewność dyskretyzacji)

W ogólnym przypadku sygnał wejściowy i sygnał wzorcowy są sygnałami niesynchronizowanymi, występują pomiędzy nimi przesunięcia czasowe (rys.2, rys.4) o wartościach Δt_1 i Δt_2 . Wartości przesunięć zmieniają się w sposób przypadkowy.

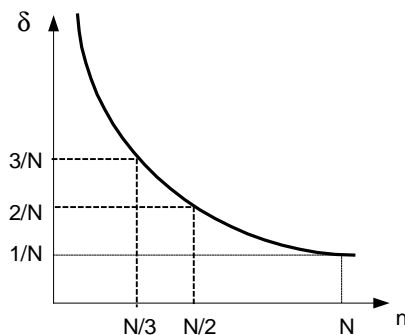
ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

Łatwo zauważyć, że skutkiem tych przesunięć jest losowa zmiana stanu licznika o wartość $\Delta n = \pm 1$.

W praktyce najczęściej przyjmuje się względną graniczną, miarę błędu dyskretyzacji, zdefiniowaną jako:

$$\delta_n = \pm \frac{|\Delta n|}{n} = \pm \frac{1}{n} \quad (5)$$

Wiadomo, że błąd dyskretyzacji występuje we wszystkich pomiarach cyfrowych. Z zależności (5) widać, że jego wartość maleje hiperbolicznie w funkcji wartości wskazania n i osiąga wartość minimalną dla pełnego wypełnienia licznika $n = N$,



sugeruje

Rys. 5. Zależność błędu dyskretyzacji od wskazania.

to, że metoda pomiarowa jak i zakres pomiaru powinny być tak dobierane, aby wypełnienie licznika było jak najbliższe maksymalnemu.

Przy małych wartościach mierzonych częstotliwości realizacja pomiarów metodą bezpośrednią wymaga więc dużych wartości wzorcowego czasu otwarcia bramki T_w dla uzyskania maksymalnego wypełnienia licznika (Tab.2). Zmniejszenie wartości błędu dyskretyzacji uzyskuje się stosując pośrednią metodę mierzając okres T_x mierzonego przebiegu i obliczając $f_x = 1/T_x$.

4.2. Błąd wzorca. (niepewność wzorca)

Sercem częstościomierza jak i czasomierza jest ten sam wzorzec częstotliwości stąd można wykazać że:

$$|\delta_{T_w}| = |\delta_{f_w}| \quad (6)$$

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

gdzie: δ_{T_w} jest błędem granicznym wzorcowego odcinka czasu T_w , a δ_{f_w} jest błędem granicznym częstotliwości wzorcowej f_w .

Składowa w postaci błędu względnego wzorca δ_{T_w} powstaje jako skutek niestałości częstotliwości generatora wzorcowego. W praktyce stosuje się stabilne generatory kwarcowe. Częstotliwość generatora zależy jednak w pewnym stopniu od temperatury i napięcia zasilania.

Współczesne generatory kwarcowe stosowane w częstotliwościomierzach - czasomierzach charakteryzują się następującymi parametrami:

- $\delta_{T_w} \leq 2.5 \cdot 10^{-6}$ zwykle rezonatory kwarcowe pracujące w temperaturze pokojowej $0^\circ\text{C} \div +50^\circ\text{C}$
- $\delta_{T_w} \leq 7 \cdot 10^{-9}$ rezonatory skompensowane cieplnie umieszczone w termostatach.

Z doświadczeń praktycznych wynika, że wpływ zmian napięcia zasilania generatora na składową δ_{T_w} jest co najmniej o rząd mniejszy, w praktyce można przyjąć, że jest do pominięcia.

Wypadkowy błąd (niepewność) pomiaru częstotliwości metodą bezpośrednią (rys.1) jest sumą błędu dyskretyzacji i błędu wzorca

$$\delta_{\text{fxb}} = \pm \left\{ \left| \frac{\Delta T_w}{T_w} \right| + \left| \frac{1}{n} \right| \right\} \quad (7)$$

Gdzie: - $\delta_{T_w} = \frac{\Delta T_w}{T_w}$ jest błędem wzorca,

- $\delta_{\text{nb}} = 1/n$ jest błędem dyskretyzacji

W mierniku odcinka czasu (rys.3) występują dwa niezależne bloki formujące, które wnoszą dwie dodatkowe składowe błędy, błąd bramkowania i błąd niesymetrii.

4.3. Błąd bramkowania (niepewność bramkowania) [1].

Błąd bramkowania (inaczej błąd wyzwiania – *trigger error*) δ_w wynika z losowego opóźnienia reakcji bramki na sygnał otwierający jak i zamykający. Spowodowany jest istnieniem szumów i zakłóceń na wejściach A i B (rys. 3.) Błąd ten ma charakter przypadkowy i widoczny jest w pomiarach okresu i odcinka czasu.

4.4. Błąd niesymetrii.

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

W pomiarze odcinka czasu, każda niesymetria pomiędzy torem „A” doprowadzającym sygnał otwierający bramkę a torem "B" doprowadzającym sygnał zamykający bramkę rys.3. wprowadza błąd systematyczny. Niesymetria może być spowodowana różną długością kabli jak i różnymi czasami propagacji sygnału w torach.

Wypadkowy błąd (niepewności) pomiaru częstotliwości metodą pośrednią zawiera trzy składowe, błąd dyskretyzacji, błąd wzorca i błąd bramkowania

$$\delta_{\text{fxp}} = \pm \left\{ \left| \frac{\Delta f_w}{f_w} \right| + \left| \frac{1}{n} \right| + |\delta_w| \right\} \quad (8)$$

gdzie: - $\delta_T = \frac{\Delta f_w}{f_w}$ jest błędem wzorca

- $\delta_{\text{np.}} = 1/n$ jest błędem dyskretyzacji
- δ_w jest błędem bramkowania

4.5. Wybór metody pomiaru.

Tab. 2. Rodzaje składowych błędów w pomiarach częstotliwości i czasu

Pomiar Rodzaj składowej błędów	Częstotliwość met. bezpośrednia	Okres (częstotliwość met. pośrednia)	Odcinek czasu	Charakter składowej błędów
dyskretyzacji	+	+	+	przypadkowy
wzorca	+	+	+	
wyzwalania		+	+	przypadkowy
niesymetrii			+	systematyczny

Nieznana częstotliwość f_x można mierzyć zarówno bezpośrednio jak pośrednio. O wyborze metody decyduje porównanie błędów pomiaru w obu przypadkach. Wystarczy porównać tylko błędy dyskretyzacji ponieważ jak wspomniano w pkt. 3.2. w obu rodzajach pomiarów przyrząd korzysta z tego samego wzorca.

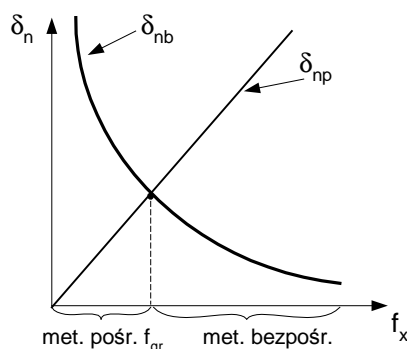
Składowa dyskretyzacji dla bezpośredniej metody pomiaru częstotliwości :

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

$$\delta_{nb} = \left| \frac{1}{n} \right| = \left| \frac{1}{f_x \cdot T_w} \right| \quad (10)$$

Dla pośredniej metody pomiaru częstotliwości

$$\delta_{np} = \left| \frac{1}{n} \right| = \left| \frac{f_x}{f_w} \right| \quad (11)$$



Rys. 6. Zależność błędu dyskretyzacji δ_n od częstotliwości mierzonej f_x dla metody pośredniej δ_{nb} i bezpośredniej δ_{np} .

Z rys. 6 widać, że do pomiaru sygnałów o częstotliwościach mniejszych od f_{gr} korzystniejsza jest metoda pośrednia a większe częstotliwości korzystniej jest mierzyć metodą bezpośrednią.

Wartość częstotliwości granicznej f_{gr} wynika z porównania zależności (10) i (11)

$$f_{gr} = \sqrt{\frac{f_w}{T_w}} \quad (12)$$

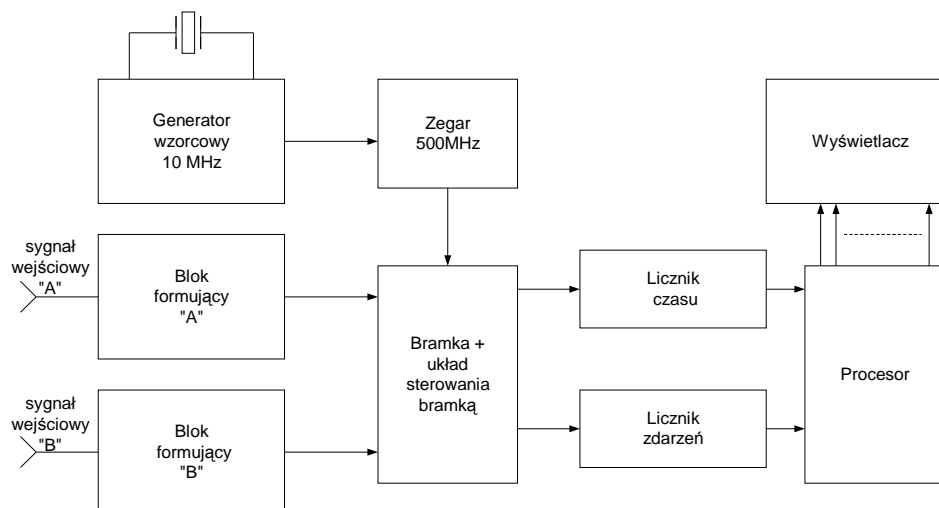
W typowych zastosowaniach, jeżeli częstotliwość sygnału wzorcowego w pomiarze pośrednim $f_w = 10^7 \text{ Hz}$, a czas pomiaru w metodzie bezpośredniej $T_w = 1 \text{ s}$, to częstotliwość graniczna $f_{gr} = \sqrt{10} \cdot 10^3 \text{ Hz} \approx 3.2 \text{ kHz}$.

Współczesne rozwiązania częstościomierzy / czasomierzy mikroprocesorowych należą do grupy przyrządów nazywanych współbieżnymi (odwzajemnymi) „*Reciprocal Counters*”, w których zarówno metoda pomiaru jak i zakres pomiaru dobierany jest automatycznie z uwzględnieniem dokładności pomiaru. Dodatkowo stosuje się

ĆWICZENIE NR 7. Sygnały Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.

zwiększanie dokładności pomiaru poprzez powtarzanie pomiarów i uśrednianie wyników jak również realizację pomiaru wielu okresów ($k=10,100,1000\dots$)

Uproszczoną strukturę przyrządu współbieżnego HP 5345A przedstawia rys. 7. W strukturze tej równolegle, w tym samym czasie pracują dwa liczniki; licznik zdarzeń, który zlicza okresy sygnału wejściowego i licznik czasu, który zlicza impulsy zegarowe, mierząc w ten sposób czas pracy licznika zdarzeń. W celu zmniejszenia błędu dyskretyzacji licznik zdarzeń zlicza impulsy aż do zebrania liczby większej od pewnej wartości minimalnej (np. 10^6 impulsów). Procesor wylicza okres (3), częstotliwość (1), (5) lub czas trwania sygnału wejściowego.

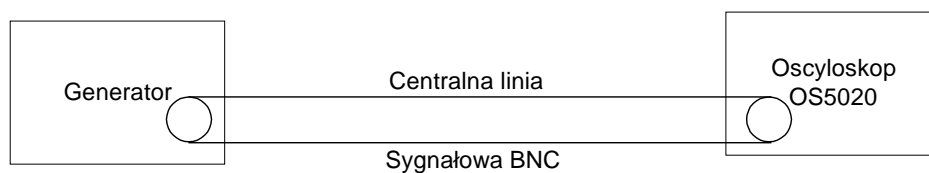


Rys.7. Uproszczona struktura przyrządu współbieżnego HP 5345A

5. Program ćwiczenia.

5.1. Pomiar okresu za pomocą oscyloskopu.

5.1.1. Zestawić układ pomiarowy jak na rys. 8.



Rys. 8. Pomiar okresu za pomocą oscyloskopu.

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

5.1.2. Dla sygnału zadanego przez prowadzącego dobrać skalę podstawy czasu $c_{[ms/cm]}$ tak, aby na ekranie eksponowany był pojedynczy okres mierzonego sygnału. Zmierzyć długość $l_{x[cm]}$ mierzonego okresu. Ocenić wartość błędu odczytu $\Delta l_{x[cm]}$.

Pomiary wykonać dla średnich wartości częstotliwości sygnału mierzonego ($100\text{Hz} \leq f_x \leq 100\text{kHz}$), najlepiej, ale niekoniecznie uzyskiwanych z generatora wzorcowego.

Uwaga!! Sprawdzić czy płynna regulacja podstawy czasu ustawiona jest w pozycji "kalibrowana"

5.1.3. Wyznaczyć wartość mierzonego okresu

$$T_x = c \cdot l_x$$

Obliczyć wartość względnego błędu pomiaru przyjmując $\left| \frac{\Delta c}{c} \right| \leq 2\%$

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left\{ \left| \frac{\Delta c}{c} \right| + \left| \frac{\Delta l_x}{l_x} \right| \right\}$$

5.1.4. Zebrać dane pomiarowe T_i i $i \in (1, n)$ dla wszystkich sześciu stanowisk pomiarowych (Tab. 3).

Tab. 3.

T_1 [s]	T_2 [s]	T_3 [s]	T_4 [s]	T_5 [s]	T_6 [s]
$\frac{\Delta T_x^{*})}{T_x} = \quad \bar{T}_x = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 T_i =$ $\Delta T_x^{*}) = \quad S = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^6 (T_i - \bar{T}_x)^2} =$					

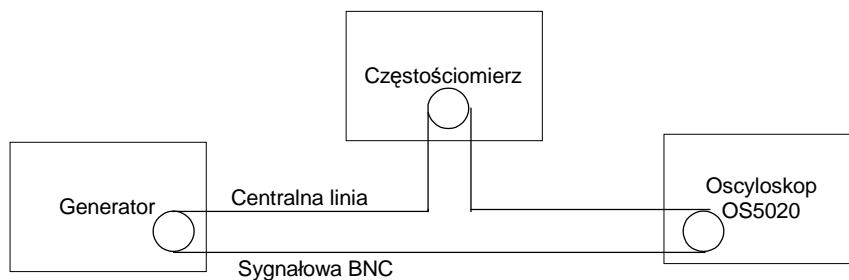
*) Dla swojego wyniku pomiaru

Wyznaczyć wartość średnią okresu $\bar{T}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ oraz odchylenie średnie kwadratowe S

$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_x)^2}$ jako miarę rozrzutu wyników pomiarów, wokół wartości średniej. Porównać wartości ΔT_x i S.

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

- 5.1.5. Powtórzyć zadania z pkt. 1.2 ÷ 1.4 dla kilku różnych wartości okresu zadanych przez prowadzącego ($10^{-5}s \div 10s$) i kilku kształtów mierzonego sygnału. Ocenic przeprowadzone pomiary, porównując uzyskane dokładności. Dokonać pomiarów dla sygnałów wzorcowych o $f_{w1} = 1 \text{ MHz}$, $f_{w2} = 10\text{MHz}$, zwrócić uwagę na odkształcenia sygnału, oraz pogorszenia dokładności odczytu wynikające z ograniczenia maksymalnej, kalibrowanej częstotliwości generatora podstawy czasu oscyloskopu. Wykonać pomiary dla małych częstotliwości $f_{w3} = 10\text{Hz}$, $f_{w4} = 1\text{Hz}$ ($f_{w5} = 0.1\text{Hz}$). Zwrócić uwagę na trudności związane z synchronizacją obrazu (ustawić synchronizację oscyloskopu w pozycji "normal") i problemy odczytu wartości okresu.
- 5.2. Pomiar okresu i częstotliwości za pomocą częstotściomierza.
- 5.2.1. Zestawić układ pomiarowy, (sygnał załączyć na wejście B częstotściomierza KZ-2025, na wejście A dla częstotściomierza PFL-22)
- 5.2.2. Zapoznać się z działaniem regulatora poziomu wyzwalania. W celu sprawdzenia działania regulatora poziomu wyzwalania należy załączyć funkcje "Częstot"



("Freq") na zakresie $T_w = 1/f_w = 10s$. Dla sygnału mierzonego, przy otwartej bramce, ustawić pokrętko "poziom" ("Level") w środku obszaru w którym zachodzi regularne zliczanie impulsów.

Rys. 9. Pomiar okresu i częstotliwości za pomocą częstotściomierza

- 5.2.3. Dla zbioru sygnałów wzorcowych (odniesienia) zadanych przez prowadzącego dokonać pomiarów częstotliwości f_x i okresu T_x . Wyniki zapisać w tablicy 4.

Wyznaczyć wartości względnych błędów pomiarów $\frac{\Delta f_x}{f_x}$ i $\frac{\Delta T_x}{T_x}$

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

Tab.4.

Lp.	f_x [Hz]	T_w [s]	T_x [s]	f_w [Hz]	$\frac{\Delta f_x}{f_x}$	$\frac{\Delta T_x}{T_x}$

Dla przeprowadzonych pomiarów wyznaczyć wartość częstotliwości granicznej f_{gr} i przeanalizować uzyskane wyniki zawarte w tablicy.

Ustawienie przełącznika "Funkcja" w trybie: "Okres" ("Period"). Przy zwartych wejściach (B i C dla KZ --2025) (A i B dla PFL-22) umożliwia pomiar okresu z rozdzielczością $0,1 \mu s \div 10s$ w zależności od dokonanego wyboru.

5.2.4. Dokonać wielokrotnego pomiaru częstotliwości f_s i okresu T_s przebiegu w sieci energetycznej Tab.5, wyznaczyć w oparciu o znajomość parametrów przyrządów wartości błędów względnych $\frac{\Delta f_s}{f_s}$ i $\frac{\Delta T_s}{T_s}$, wyznaczyć wartość

średnią częstotliwości $\bar{f}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{si}$ oraz odchylenie średnie kwadratowe

$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_{si} - \bar{f}_s)^2}$ jako miarę rozrzutu wyników pomiarów wokół średniej.

Tab.5.

Lp.	f_s [Hz]	$\frac{\Delta f_s}{f_s} =$
		$f_s =$
		$\bar{f}_s =$
		$S =$

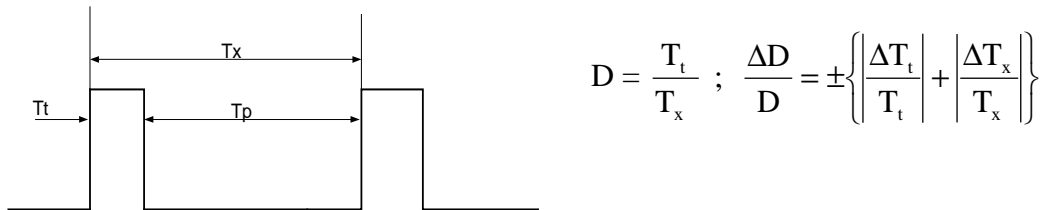
5.2.5. Zapoznać się z działaniem przełączników wyboru zbczy wyzwalających, dokonać pomiaru okresu T_x , czasu trwania T_t , czasu przerwy T_p sygnałów prostokątnych (rys. 10), współczynnika wypełnienia D. Wyznaczyć wartość

błędu względnego współczynnika wypełnienia $\frac{\Delta D}{D}$. Pomiar parametrów

czasowych uruchamia klawisz "czas" ("T I B-C") przełącznika funkcji przy zwartych wejściach (B i C dla KZ 2025), (A i B dla PFL -22). Pomiar możliwy jest z rozdzielczością $0.1 \mu s \div 10s$ w zależności od wyboru. Realizacja pomiarów może być dokonywana przy automatycznej regulacji poziomu odniesienia w

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

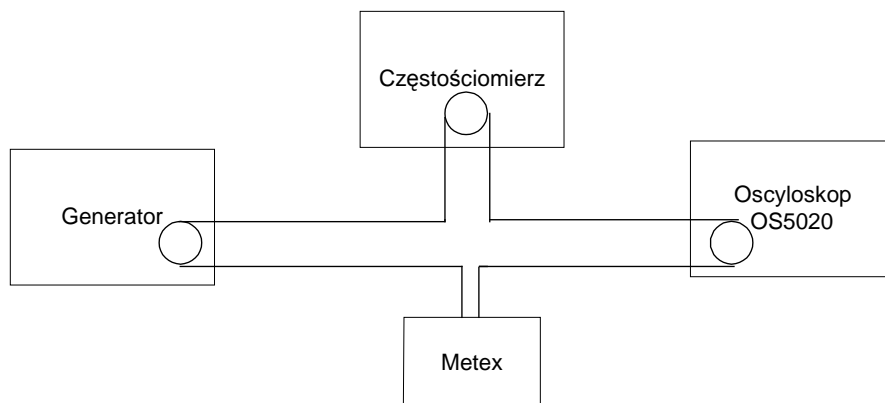
zakresie $0,3 < D < 0,7$, o wyborze T_t , T_p lub T_x decydują przełączniki wyboru zboczy wyzwalających.



$$D = \frac{T_t}{T_x} ; \frac{\Delta D}{D} = \pm \left\{ \left| \frac{\Delta T_t}{T_t} \right| + \left| \frac{\Delta T_x}{T_x} \right| \right\}$$

Rys. 10. Parametry czasowe przebiegu prostokątnego.

5.2.6. W strukturze jak na rysunku dokonać pomiarów częstotliwości f_x sygnałów z generatorów znajdujących się na stanowisku.



Rys.11 Pomiar częstotliwości za pomocą różnych przyrządów.

Wyznaczyć wartości błędów $\frac{\Delta f_x}{f_x}$ dla każdego z przyrządów, porównać uzyskane wyniki.

ĆWICZENIE NR 7. **Sygnaly Elektryczne – parametry częstotliwościowe i czasowe.**

Tab. 6.

Lp.	CZĘSTOŚCIOMIERZ				Uwagi
	KZ (PFL)		METEX		
	f_x [Hz]	$\frac{\Delta f_x}{f}$	f_x [Hz]	$\frac{\Delta f_x}{f_x}$	

6. Literatura:

1. Chwaleba A, Poniński M, Siedlecki A, Metrologia Elektryczna. Warszawa, WNT 1996.
2. Zielonko R, Bartosiński i inni: Laboratorium z Podstaw Miernictwa. Gdańsk 1998. WPG.
3. Mała Encyklopedia Metrologii. Warszawa, WNT 1989.