

# **CYFROWE PRZYRZĄDY do POMIARU PARAMETRÓW CZASOWO- CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH SYGNAŁÓW OKRESOWYCH**

## **Plan**

- 1. Wstęp**
- 2. Bezpośredni cyfrowy pomiar częstotliwości sygnału okresowego (sinusoidalnego)**
- 3. Pośredni cyfrowy pomiar częstotliwości okresowego (pomiar okresu sygnału)**
- 4. Efekty kwantowania podczas cyfrowego pomiaru częstotliwości i okresu. Kryteria doboru metody pomiaru częstotliwości .**
- 5. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości**
- 6. Cyfrowy pomiar częstotliwości z zadaną dopuszczalną wartością błędu zliczania.**
- 7. Metoda wagowa pomiaru częstotliwości**
- 8. Metoda zbiegu (koindcendencji)**

## 1.Wstęp.

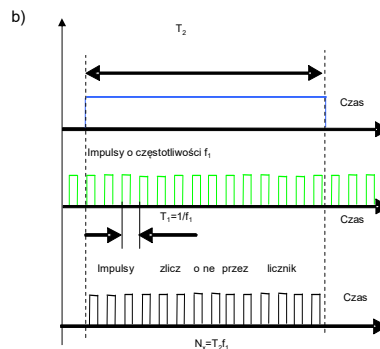
### Parametry czasowo-częstotliwościowe:

- częstotliwość sygnału okresowego;
- okres sygnału okresowego;
- trwałość impulsu;
- przesunięcie fazowe dwóch sygnałów;
- stosunek częstotliwości;
- inne.

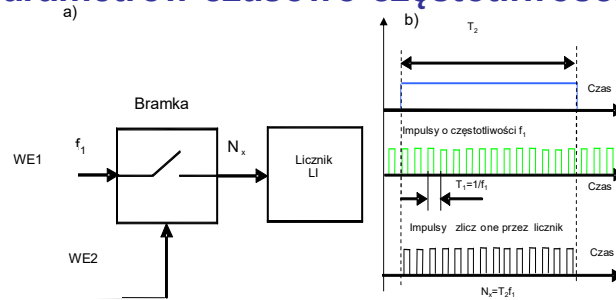
## 1. Wstęp. Zasada cyfrowego pomiaru parametrów czasowo-częstotliwościowych

Cyfrowe pomiaru parametrów czasowo-częstotliwościowych bazują na zliczaniu (przez licznik) liczby impulsów o częstotliwości  $f_1$  w przedziale czasu  $T_2$ .

Przebiegi czasowe przetwarzania A/C liczby impulsów

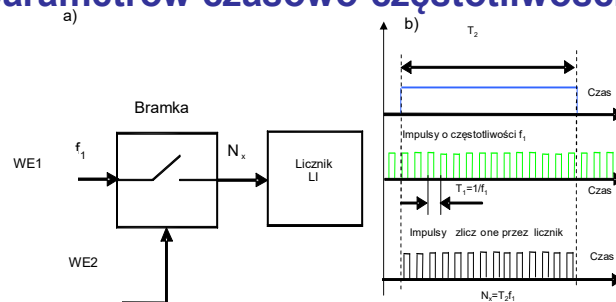


## 1. Wstęp. Zasada cyfrowego pomiaru parametrów czasowo-częstotliwościowych



Dlatego **podstawowymi elementami** przetworników analogowo-cyfrowych tych parametrów są:  
**bramka B**, otwierana na czas  $T_2$ , oraz  
**licznik impulsów LI**, który zlicza impulsy o częstotliwości  $f_1$  (okresie  $T_1 = 1/f_1$ )

## 1. Wstęp. Zasada cyfrowego pomiaru parametrów czasowo-częstotliwościowych

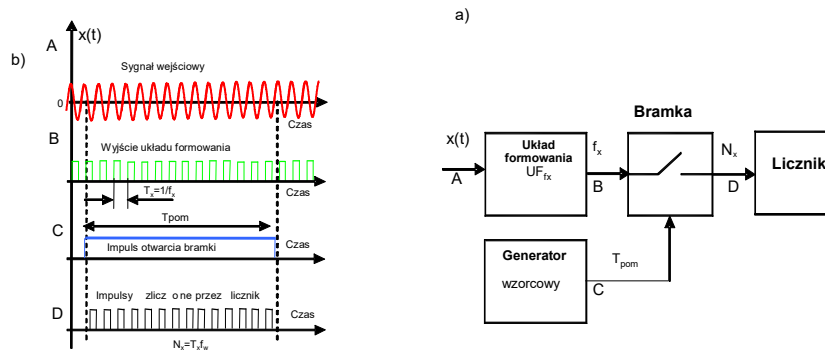


**Liczba zliczonych impulsów (wynik pomiaru) równa się**

$$N_x = \text{liczba całkowita} \left[ \frac{T_2}{T_1} \right] = \text{liczba całkowita} [T_2 \cdot f_1]$$

## 2. Cyfrowy pomiar częstotliwości

- Cyfrowy pomiar częstotliwości polega na wstępnym przetwarzaniu w każdym kresu sygnału wejściowego na jeden impuls  $T_x = 1/f_x$  z następnym zliczaniem (przez licznik) tych impulsów w czasie zadanego interwału czasowego  $T_{pom}$ .
- W tym celu, podobnie jak poprzednio, wykorzystują się wejściowy układ formowania (UF<sub>x</sub>) oraz generator impulsów (Gen.) który na wyjściu formuje impuls otwierający bramkę  $T_{pom}$ .



## 2. Cyfrowy pomiar częstotliwości

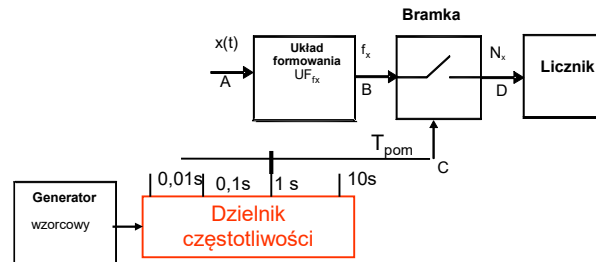
- Liczba zliczonych impulsów – wynik pomiaru :

$$N_x = \text{liczba całkowita} \left[ \frac{T_{pom}}{T_x} \right] = \text{liczba całkowita} [T_{pom} f_x]$$

- i jest proporcjonalną do wartości mierzonej częstotliwości.

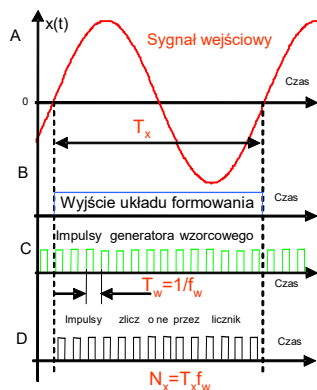
## 2. Cyfrowy pomiar częstotliwości

- Zmiana zakresu pomiaru
- Zakres pomiaru można zmieniać poprzez **zmianę czasu pomiaru  $T_{\text{pom}}$**  w taki sposób żeby liczba zliczonych w liczniku impulsów była jak największą jednak żeby licznik się nie przepełnił.
- W tym celu na wyjściu generatora wykorzystuje się **dzielnik częstotliwości**



## 3. Cyfrowy pomiar okresu sygnału

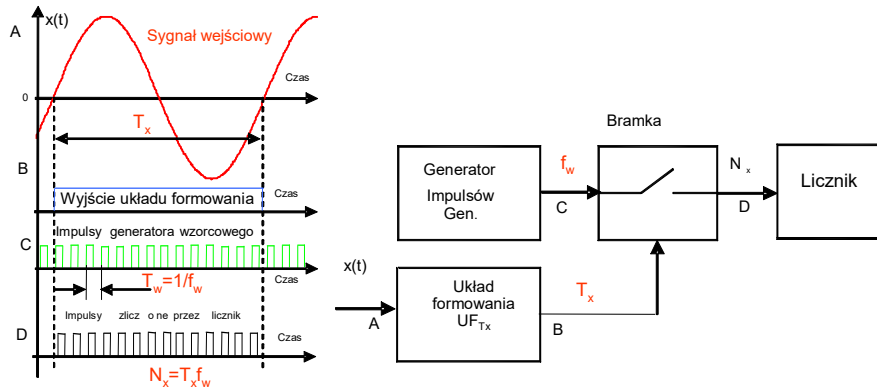
Cyfrowy pomiar okresu polega na jego **wstępnym przetworzeniu w impuls otwierający bramkę  $T_x = T_2$**  z następnym **zliczaniem** (przez licznik) **impulsów o wzorcowej** (precyzyjnie znanej) **częstotliwości  $f_1 = f_w$** .



### 3. Cyfrowy pomiar okresu sygnału

W tym celu wykorzystują się:

- **wejściowy układ formowania** (UFT<sub>x</sub>) dla formowania impulsu otwierającego bramkę i którego **trwałość równa się jednemu okresowi**  $T_2 = T_x$  (lub kilku okresom  $T_2 = mT_x$ );
- **generator impulsów** częstotliwości wzorcowej  $f_1 = f_w$  (Generator impulsów, Gen.)

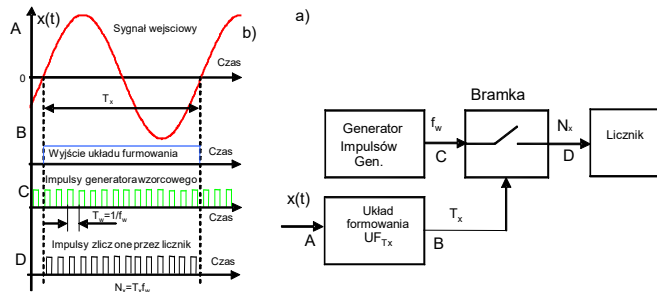


### 3. Cyfrowy pomiar okresu sygnału

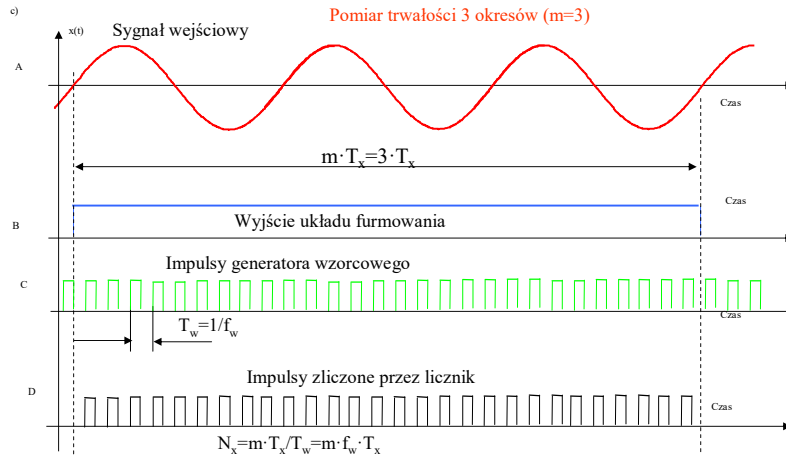
Wynik pomiaru - liczba zliczonych impulsów –wynosi:

$$N_x = \frac{T_x}{T_w} = T_x f_w$$

i ona jest proporcjonalną do wartości okresu.



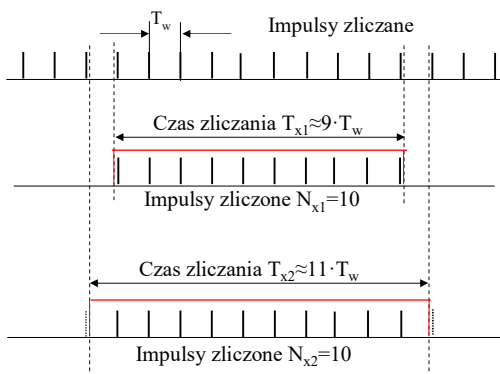
### 3. Cyfrowy pomiar okresu sygnału



$$N_x = \frac{m \cdot T_x}{T_w} = m \cdot T_x \cdot f_w = 3 \cdot T_x \cdot f_w$$

### 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Pomiar okresu (interwału czasowego)



Pomiar 1:

$$T_{m1} = N_{x1} \cdot T_w = 10 \cdot T_w$$

Pomiar 2:

$$T_{m2} = N_{x2} \cdot T_w = 10 \cdot T_w$$

Wartości **rzeczywiste** czasu zliczania impulsów:

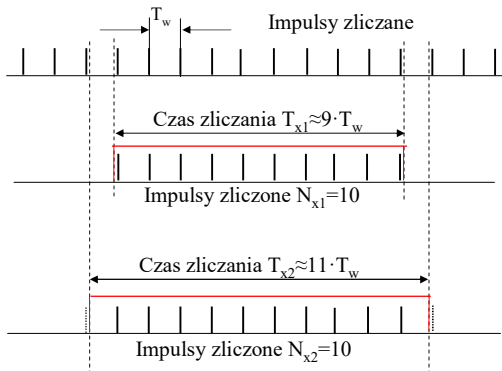
$$T_{x1} = 9 \cdot T_w; \quad T_{x2} = 11 \cdot T_w$$

## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Pomiar okresu (interwału czasowego)

Wartości graniczne błędu zliczania w jednostkach okresu impulsów zliczanych:

$$-1 \leq \Delta_{zl,gr} = \frac{\Delta_{gr}}{T_w} \leq +1$$

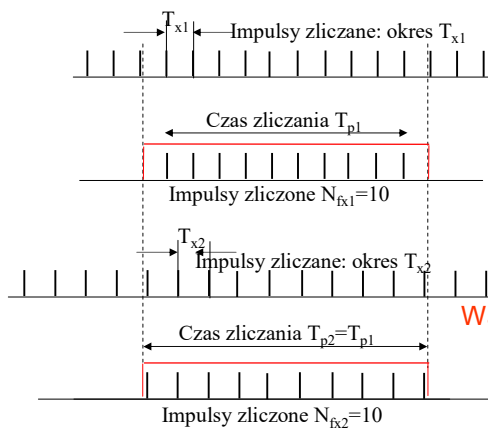


W najgorszym przypadku, przy braku synchronizacji interwału otwarcia bramki (czasu zliczania) z impulsami zliczanymi, maksymalny błąd zliczania nie przekracza  $\pm 1$  impulsu:

$$\Delta_{zl,gr} = \pm 1$$

## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Pomiar częstotliwości:  $f_x = 1/T_x$



Błąd pomiaru 1:

$$\Delta_{m,f1} = f_{m1} - f_{x1} = 10/T_p - 11/T_p = -1/T_p$$

Błąd pomiaru 2:

$$\Delta_{m,f2} = f_{m2} - f_{x2} = 10/T_p - 9/T_p = +1/T_p$$

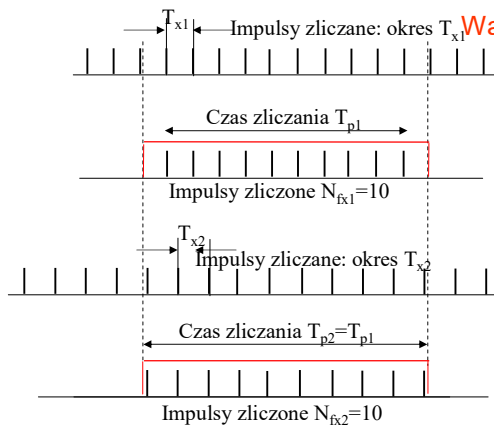
Wartości graniczne błędu zliczania

$$-1/T_p \leq \Delta_{m,gr} \leq 1/T_p$$



## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Pomiar częstotliwości:  $f_x = 1/T_x$



Wartości graniczne błędu zliczania w jednostkach trwałości czasu pomiarowego

$$-1 \leq \Delta_{z,l,f,gr} = \Delta_{m,f,gr} T_p \leq +1$$

W najgorszym przypadku, przy braku synchronizacji interwału otwarcia bramki (czasu zliczania) z impulsami zliczanymi, maksymalny błąd zliczania nie przekracza  $\pm 1$  impulsu

$$\Delta_{z,l,f,gr} = \pm 1$$

## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Względny błąd pomiaru okresu i częstotliwości:

**Bezpośredni pomiar częstotliwości**

Przy zliczonych  $N_x$  impulsach względny maksymalny błąd zliczania nie przekracza

$$\delta_{z,l,f,gr} = \frac{\Delta_{z,l,gr}}{N_x} 100\% = \frac{\pm 1}{f_x T_p} 100\% \quad (10^6 \text{ ppm})$$

**Pośredni pomiar częstotliwości przez pomiar okresu (lub m okresów sygnału)**

Liczba zliczonych impulsów:  $N_x = f_w \cdot m \cdot T_x = m \cdot f_w / f_x$

Wartość częstotliwości

$$f_x = \frac{m \cdot f_w}{N_x}$$

Przy zliczonych  $N_x$  impulsach względny maksymalny błąd zliczania nie przekracza

$$\delta_{z,l,gr}(T_x) = \frac{\pm 1}{f_w \cdot m} f_x \cdot 100\%$$

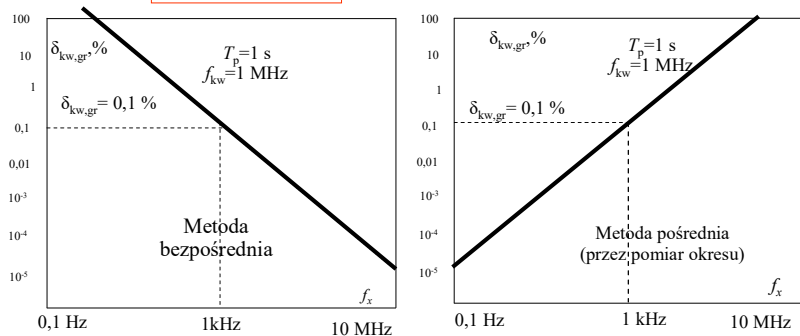
## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Względny błąd pomiaru częstotliwości:

Bezpośredni pomiar częstotliwości      Pośredni pomiar częstotliwości

$$\delta_{kw,gr} = \frac{\pm 1}{f_x \cdot T_p} 100\%$$

$$\delta_{kw,gr(T_x)} = \frac{\pm 1}{f_{kw} \cdot m} f_x \cdot 100\%$$

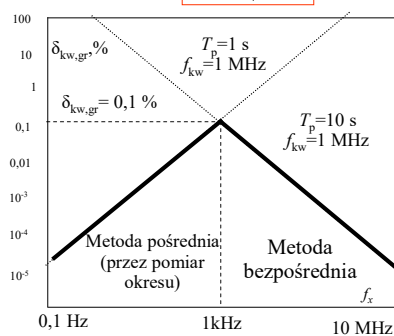


## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Częstotliwość graniczna pomiaru częstotliwości:

$$\delta_{kw,gr}(f_x) = \delta_{kw,gr}(T_x)$$

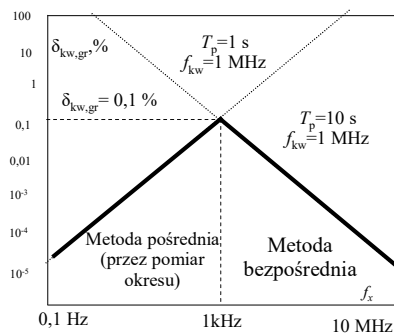
$$f_{kw,gr} = \sqrt{\frac{m \cdot f_x}{T_p}}$$



## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Maksymalny błąd kwantowania osiąga się na częstotliwości granicznej  $f_x = f_{x,gr}$  i równa się :

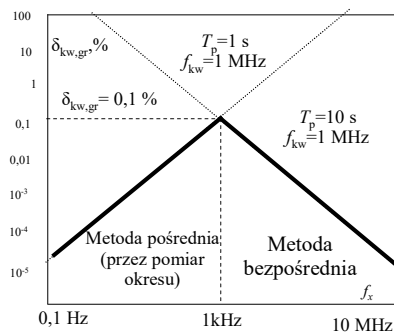
$$\delta_{kw,gr}(f_x) = \frac{\pm 1}{T_p \cdot f_{x,gr}} 100\% = \frac{\pm 1}{T_p \cdot \sqrt{\frac{m \cdot f_w}{T_p}}} 100\% = \frac{\pm 1}{\sqrt{m \cdot f_w \cdot T_p}} 100\%$$



## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Maksymalny błąd kwantowania osiąga się na częstotliwości granicznej  $f_x = f_{x,gr}$  i równa się :

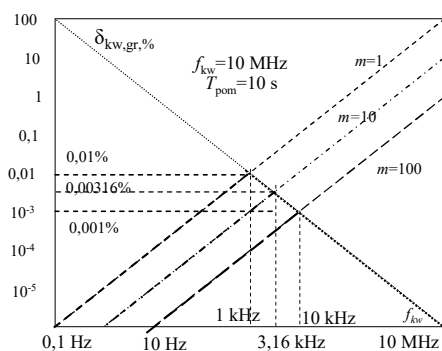
$$\delta_{kw,gr}(f_x) = \frac{\pm 1}{T_p \cdot f_{x,gr}} 100\% = \frac{\pm 1}{T_p \cdot \sqrt{\frac{m \cdot f_w}{T_p}}} 100\% = \frac{\pm 1}{\sqrt{m \cdot f_w \cdot T_p}} 100\%$$



## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Zależności maksymalnego błędu kwantowania przy różnych wartościach liczby mierzonych okresach sygnału wejściowego :

$$\delta_{kw,gr}(f_x) = \frac{\pm 1}{T_p \cdot f_{x,gr}} 100\% = \frac{\pm 1}{T_p \cdot \sqrt{\frac{m \cdot f_w}{T_p}}} 100\% = \frac{\pm 1}{\sqrt{m \cdot f_w \cdot T_p}} 100\%$$

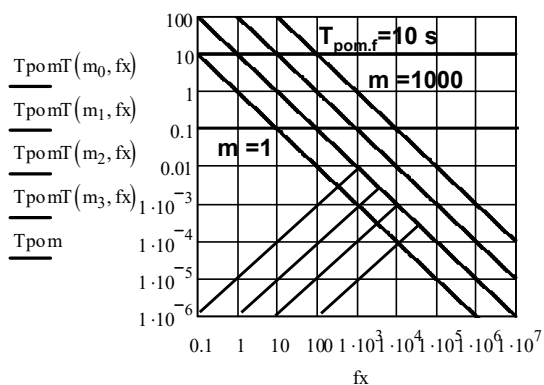


## 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Zależności czasu pomiaru w obydwu metodach:

Metoda bezpośrednia –  $T_{pom,f} = T_{pom}$

Metoda zpośrednia –  $T_{pom,T} = m \cdot T_x = m/f_x$



#### 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Zależności czasu pomiaru w obydwu metodach:

Metoda bezpośrednia –  $T_{pom,f} = T_{pom}$

Metoda pośrednia –  $T_{pom,T} = m \cdot T_x = m/f_x$

W celu poprawnego porównania dokładności pomiaru częstotliwości w obydwu metodach ich analizę należy przeprowadzić dla jednakowych warunków.

W tym przypadku należy przyjąć ten sam czas pomiaru w obydwu metodach  $T_{pom,T} = T_{pom,f}$

$$\text{Tj. } m/f_x = T_{pom,f} \text{ lub } m = T_{pom,f} \cdot f_x = N_{x,f}$$

#### 4. Błąd kwantowania okresu- błąd zliczania

Zależności czasu pomiaru w obydwu metodach:

Stąd przy takim warunku w metodzie pośredniej względny maksymalny błąd pomiaru jest równy

$$\delta_{zlicz}(T_x) = \frac{\pm 1}{f_w \cdot m} f_x \cdot 100\% = \frac{\pm 1}{f_w \cdot T_{pom} \cdot f_x} f_x \cdot 100\% = \frac{\pm 1}{f_w \cdot T_{pom}} \cdot 100\% = \frac{\pm 1}{N_{w,nom}} \cdot 100\%$$

I zależy tylko od podstawowych parametrów miernika:  $f_w$  oraz  $T_{pom}$ , i nie zależy od częstotliwości mierzonej.

W nowoczesnych miernikach pomiar okresu oraz częstotliwości wykonuje się metodą pośrednią przy stałym czasie pomiaru, np. 0.01 s, 0.1 s, 1 s, 10 s z następnym przeliczeniem w wartość częstotliwości

### 5. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości

Z poprzedniego materiału wynika, że metoda pośrednia (przez pomiar okresu) na ogół zapewniają mniejszy efekt kwantowania (zliczania) impulsów.

Otóż, jeśli podczas pomiaru częstotliwości metodą pośrednią wymagano jest zapewnienie zadanego czasu pomiaru  $T_{pom}$ , nie wystarczy jednego licznika impulsów.

W tym celu należy użyć dwa liczniki wykorzystywane:

- jeden dla zliczania  $N_x$  impulsów zegarowych o częstotliwości  $f_w$  (pośredni pomiar)
- drugi dla zliczania liczby  $m$  okresów sygnału mierzonego -  $m = T_{pom} \cdot f_x = N_{x,f}$  pomiar bezpośredni.

zliczanie impulsów  $N_x$  zegarowych o częstotliwości  $f_w$  (metoda pośrednia) z jednoczesnym zliczaniem liczby okresów ( $m$ ):  $mT_x$  sygnału (metoda bezpośrednia) pod warunkiem, że trwałość zliczania impulsów nie przekroczy  $T_{pom}$  :

$$mT_x \leq T_{pom}$$

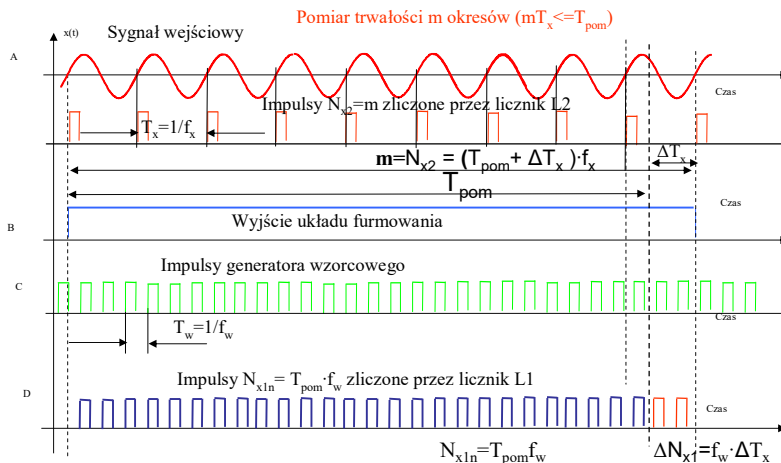
### 5. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości

zliczanie impulsów  $N_x$  zegarowych o częstotliwości  $f_w$  (metoda pośrednia) z jednoczesnym zliczaniem liczby okresów ( $m$ ):  $mT_x$  sygnału (metoda bezpośrednia) pod warunkiem, że trwałość zliczania impulsów nie przekroczy  $T_{pom}$  :

$$mT_x \leq T_{pom}$$

W pewnych przypadkach czas zliczania impulsów ( $mT_x$ ) może przekroczyć zadany czas pomiaru  $T_{pom}$  maksymalnie o 1 okres sygnału zegarowego?.

## 5. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości



Wynik pomiaru: 
$$T_{pom} + \Delta T_x = \frac{N_{x1n} + \Delta N_{x1}}{f_w} = N_{x2} \cdot T_x = \frac{N_{x2}}{f_x}; \quad f_x = \frac{N_{x2} \cdot f_w}{N_{x1n} + \Delta N_{x1}}$$

## 5. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości

W tej metodzie faktyczny czas pomiaru

$$T'_{pom} = m \cdot T_x = N_{x2} \cdot T_x$$

różni się (jest większy) od zadanego czasu  $T_{pom}$ .

Ta różnica nie przekracza jednego okresu  $T_x$  sygnału mierzonego.

Ponieważ  $T'_{pom} = T_{pom} + \Delta T_x$

dlatego należy dodatkowo zmierzyć interwał czasu  $\Delta T_x$  od końca zadanego czasu pomiaru  $T_{pom}$  do ostatniego impulsu (okresu) sygnału wejściowego

Ten interwał czasu  $\Delta T_x$  jest mierzony poprzez zliczanie impulsów zegarowych w liczniku L1:

$$\Delta N_x = \Delta T_x \cdot f_w$$

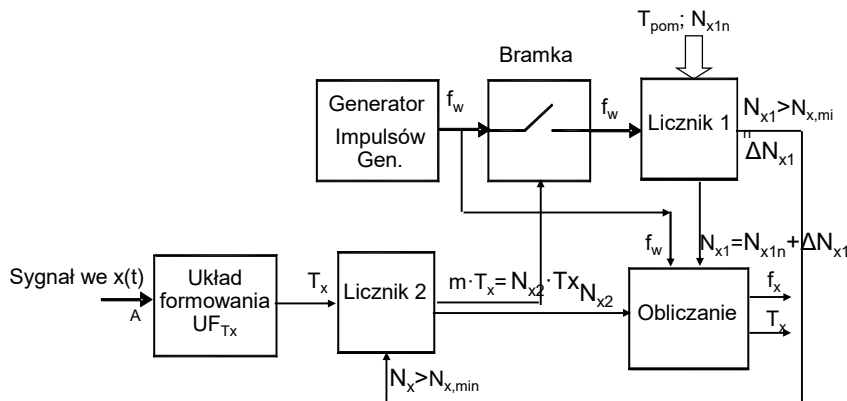
po zerowaniu tego licznika po zliczonej liczbie impulsów

$$N_{x1n} = T_{pom} \cdot f_w$$

Te dodatkowo zliczone impulsy będą uwzględniane w sumarycznej liczbie impulsów  $N_{x1} = N_{x1n} + \Delta N_x$

## 6. Modyfikowana metoda pomiarowa z zadaniem czasem pomiaru

Uproszczony schemat blokowy układu pomiaru częstotliwości (okresu) przy zadanej trwałości pomiaru



## 5. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości

W tej metodzie względny maksymalny (graniczny) błąd zliczania podczas pomiaru częstotliwości nie przekroczy wartości:

$$\delta_{z.l.f.gr} = \frac{\pm 1}{N_{x1}} 100\% = \frac{\pm 1}{N_{x2} T_x f_w} \approx \frac{\pm 1}{T_{pom} f_w} 100\% = \frac{\pm 1}{N_{x1n}} 100\% \quad (10^6 \text{ ppm})$$

i jest w przybliżeniu stałą wartością zależną od czasu pomiaru  $T_{pom}$  i częstotliwości wzorcowej  $f_w$ .

Okres sygnału w tej metodzie jest równy:

$$T_x = \frac{N_{x1n} + \Delta N_{x1}}{N_{x2} \cdot f_w}$$

Przy tej samej wartości maksymalnego względnego błędu zliczania.

Ta metoda łatwo realizuje się w wirtualnych cyfrowych przyrządach zbudowanych na bazie kart pomiarowych z 2 licznikami.



## 5. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości

Cyfrowy pomiar częstotliwości z zadaniem czasem pomiaru  $T_{\text{pom}}$

**Przykład**

Zadano: czas pomiaru:  $T_{\text{pom}} = 0.01\text{s}$ ;

Częstotliwość generatora zegarowego (wzorcowego)  $f_w = 1\text{ MHz}$ .

Licznik L1 po zliczeniu nominalnej liczby impulsów  $N_{x1n}$  w dodatkowym interwale czasu  $\Delta T_x$  dodatkowo zliczył  $\Delta N_{x1} = 59$  impulsów.

Dodatkowy licznik L2 obliczył  $N_{x2} = 258$  okresów  $T_x$  sygnału mierzonego

Wyznaczyć wartość częstotliwości i okresu sygnału mierzonego.

## 5. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości

**Rozwiązanie:**

Dla zadanego czasu pomiaru  $T_{\text{pom}} = 0.01\text{s}$  oraz częstotliwości wzorcowej  $f_w = 1\text{ MHz}$  nominalna liczba zliczanych impulsów jest równa

$$N_{x1n} = T_{\text{pom}} f_w = 0.01\text{ s} \cdot 1 \cdot 10^6\text{ Hz} = 10\,000$$

Przy zadanych wartościach  $f_w = 1\text{ MHz}$ ,  $\Delta N_{x1} = 59$ ,  $N_{x2} = 258$

$$f_x = \frac{N_{x2}}{N_{x1n} + \Delta N_{x1}} f_w = \frac{258}{10000 + 59} 10^6\text{ Hz} \approx 25.6487 \cdot 10^3\text{ Hz} = 25.6487\text{ kHz};$$
$$T_x = \frac{1}{f_x} = \frac{1}{25.6487 \cdot 10^3\text{ Hz}} \approx 3.8988 \cdot 10^{-5}\text{ s} = 38.988\text{ }\mu\text{s}$$

**Względny maksymalny błąd zliczania (kwantowania)**

$$\delta_{\text{kw.gr}} = \pm \frac{100\%}{N_{x1n} + \Delta N_{x1}} = \pm \frac{100\%}{10\,000 + 59} \approx 0.00994\% \approx 0.01\%$$