

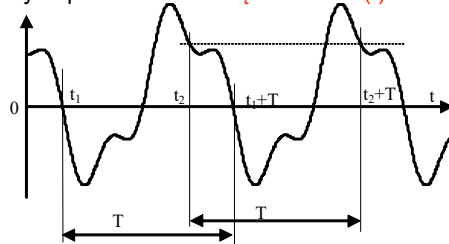
POMIARY CZĘSTOTLIWOŚCI SYGNAŁÓW OKRESOWYCH

Plan wykładu

- 1. Wstęp.**
- 2. Bezpośredni cyfrowy pomiar częstotliwości sygnału okresowego**
- 3. Pośredni cyfrowy pomiar częstotliwości sygnału okresowego – przez pomiar okresu**
- 4. Błąd i niepewność zliczania podczas pomiaru częstotliwości.**
- 5. Częstotliwość graniczna.**
- 5. Metoda pośrednia z zadanyym czasem pomiaru częstotliwości**

1. Wstęp

W dziedzinie czasu sygnał okresowy charakteryzuje się dwoma najważniejszymi parametrami: **częstotliwość (f)** i **okres (T)**.



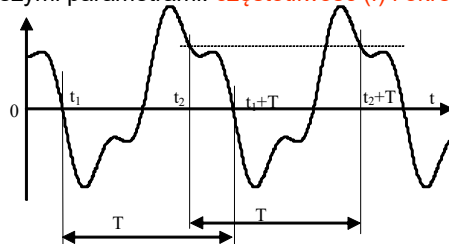
Okres T – jest minimalnym interwałem czasowym, dla którego w dowolny moment czasowy t spełniona jest zależność:

$$x(t)=x(t+T),$$

lub inaczej – jest to minimalny interwał czasowy T po którym sygnał powtarza swoje wartości niezależnie od początkowego momentu czasowego t .

1. Wstęp

W dziedzinie czasu sygnał okresowy charakteryzuje się dwoma najważniejszymi parametrami: **częstotliwość (f)** i **okres (T)**.



Częstotliwość sygnału okresowego jest liczbą okresów sygnału w jednostkę czasu (1 s, 1 ms, 1 μ s,...)

Częstotliwość sygnału okresowego jest odwrotnością okresu

$$f=1/T$$

Jednostką częstotliwości jest herc - Hz, kiloherc – kHz=1000Hz, megaherc – MHz=10⁶Hz, gigaherc – GHz=10⁹ Hz

1. Wstęp

Metody pomiaru częstotliwości:
częstościerzami oraz metodami porównawczymi.

Częstościerz:
- analogowe (elektromechaniczne i elektroniczne) i
- cyfrowe.

Metody porównawcze:
oscyloskopowe,
rezonansowe,
heterodynowe,
mostkowe.

1. Wstęp

Częstościerz analogowe (elektromechaniczne i elektroniczne)

Analogowe elektromechaniczne częstościerz z przetwornikami:
magnetoelektrycznymi, elektromagnetycznymi,
elektrodynamicznymi i ferrodynamicznymi i obwodem zależnym od częstotliwości

wykorzystywane są do pomiaru częstotliwości sygnałów w przemyśle w zakresie od 20 Hz do 2,5 kHz, najczęściej w zakresie częstotliwości sieci przemysłowej: 45-55 Hz.

Dokładność pomiaru jest stosunkowo niewysoka
(klasa dokładności takich częstościerz - 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5).

1. Wstęp

Częstościomierze analogowe (elektromechaniczne i elektroniczne)

Analogowe elektroniczne częstościomierzy (kondensatorowe) wykorzystują się do pomiaru częstotliwości sygnałów w zakresie od 10 Hz do 500 kHz przy regulacji i nastrojeniu aparatury elektronicznej.

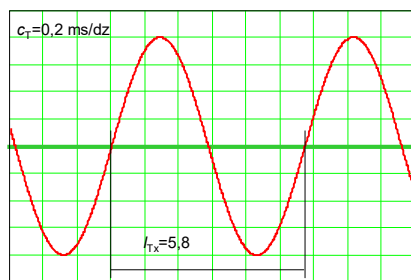
Klasa dokładności takich częstościomierze taka sama - 0,2; 0,5; 1,0; 1,5).

Cyfrowe częstościomierzy wykorzystują się do dokładnego pomiaru częstotliwości sygnałów w **bardzo szerokim zakresie** od 1 Hz i niżej do 10 GHz (10^{10} Hz) i wyżej oraz interwałów czasowych w zakresie od 1 ns (10^{-9} s) i niżej do kilku godzin (10^5 s).

Cyfrowe częstościomierzy są to mierniki o największej dokładności: względna niepewność wyniku pomiaru częstotliwości i interwału czasu może wynosić poniżej $10^{-7}\%$.

1. Wstęp

Metoda oscyloskopowa poprzez **pomiar okresu** wykorzystuje się do pomiaru częstotliwości w **zakresie od 10 Hz do 20 MHz** (w typowym paśmie częstotliwościowym oscyloskopu).



$$T_x = l_{Tx} \cdot c_T = 5,8dz \cdot 0,2 ms / dz = 1,16 ms$$

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{1}{1,16 ms} \approx 862 Hz$$

Dokładność pomiaru okresu (częstotliwości poprzez **pomiar okresu**) jest **niewysoką** – kilka procent.

1. Wstęp

Metoda oscyloskopowa z wykorzystaniem figur Lissajous

Dokładność pomiaru częstotliwości za pomocą oscyloskopu może być zwiększona poprzez wykorzystanie metody porównawczej:

porównania mierzonej częstotliwości z referencyjną, a oscyloskop w tym przypadku spełnia rolę układu porównawczego.

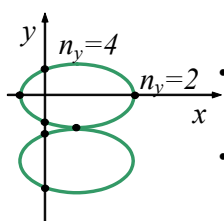
Najczęściej wykorzystuje się porównawczą metodę z wykorzystaniem figur Lissajous.

Metoda polega na tym, że liniowa podstawa czasu oscyloskopu jest odłączana, zamiast której do wejść „x” podawano jest napięcie sinusoidalne (z generatora sygnałów) o znanej częstotliwości $f_{ref}=f_{gen}$.

Do wejść „y” podawano jest napięcie badane.

1. Wstęp

Metoda oscyloskopowa z wykorzystaniem figur Lissajous



Interferencyjne figury Lissajous

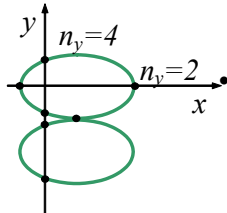
- Regulując częstotliwość generatora f_{gen} zewnętrznego osiągają stabilny obraz na ekranie oscyloskopu.
- Kształt figury zależy od stosunku częstotliwości badanego i wzorcowego sygnałów oraz częściowo od ich amplitud i faz.
- Stałe (nieruchome) figury Lissajous otrzymują się jeśli obydwie częstotliwości są równe lub ich stosunek jest stosunkiem liczb całkowitych:

$$\frac{f_{ref}}{f_x} = \frac{n_x}{n_y}$$

- (gdzie n_x, n_y są maksymalnymi liczbami przecięć figurą poziomą (równoległą do osi OX) oraz pionową (równoległą do osi OY) linii przechodzących przez punkty przecięcia samej figury.
- Stąd wynik pomiaru: $f_x = f_{ref} \frac{n_y}{n_x}$,

1. Wstęp

Metoda oscyloskopowa z wykorzystaniem figur Lissajous



Interferencyjne figury
Lissajous

- Wynik pomiaru:

$$f_x = f_{ref} \frac{n_y}{n_x}$$

Na przykład na rysunku $n_x=2$ oraz $n_y=4$, i stąd częstotliwość sygnału badanego

$$f_x = \frac{4}{2} f_{ref} = 2 f_{ref}$$

- Dokładność pomiaru częstotliwości metodą figur Lissajous wyznaczana jest dokładnością częstotliwości generatora sygnału wzorcowego i wynosi około

$$\delta_{f_{gen}} = 10^{-4}\% \dots 1,0\%$$

1. Wstęp

Metody porównawcze rezonansowa i heterodynowa wykorzystują się do pomiaru częstotliwości sygnałów modulowanych w zakresie od 50 kHz do 20 GHz w pomiarach radiotechnicznych.

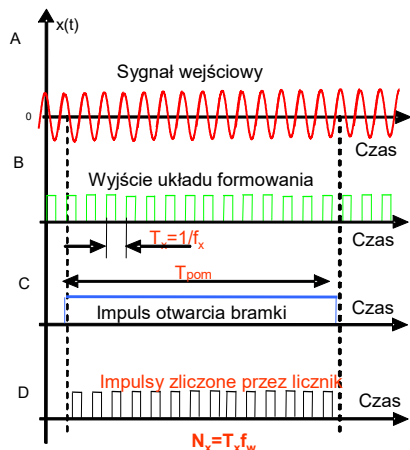
Dokładność pomiaru wyznaczana jest **dokładnością generatora wzorcowego**.

Metoda mostkowa (np. mostek Robinsona) z elementami częstotliwościowo zależnymi wykorzystują się do pomiaru częstotliwości w dźwiękowym zakresie częstotliwości: od 20 Hz do 20 kHz.

Dokładność pomiaru metodą mostkową stosunkowo niewysoka

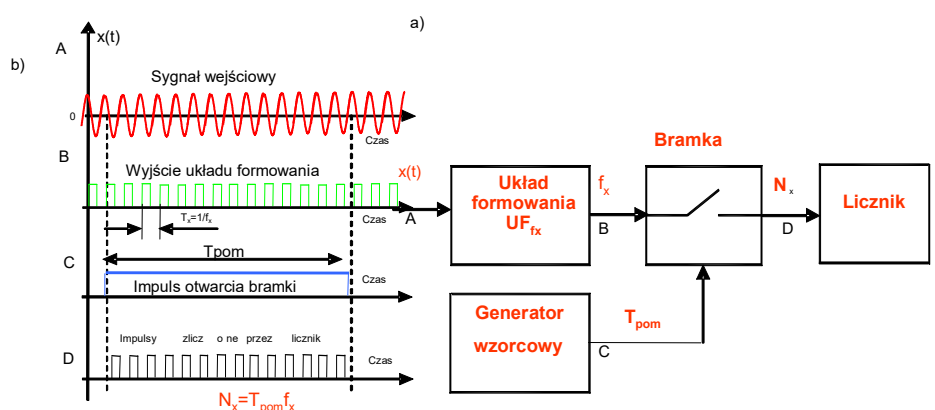
2. Bezpośredni cyfrowy pomiar częstotliwości

- Cyfrowy pomiar częstotliwości polega na wstępnym przetwarzaniu w każdym kresu sygnału wejściowego na jeden impuls z tym samym okresem $T_x = 1/f_x$, co i okres sygnału, z następnym zliczaniem (przez licznik) tych impulsów w czasie zadanego interwału czasowego T_{pom} .



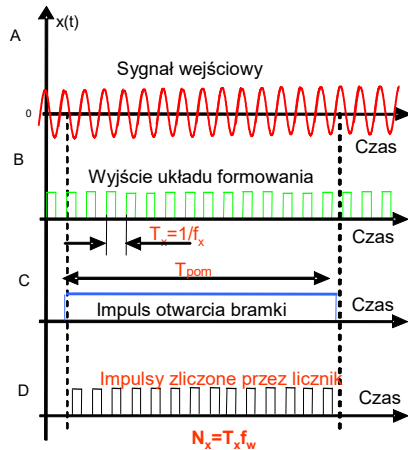
2. Bezpośredni cyfrowy pomiar częstotliwości

- W tym celu, podobnie jak poprzednio, wykorzystują się wejściowy układ formowania (UF_x) oraz generator impulsów (Gen.) który na wyjściu formuje impuls otwierający bramkę T_{pom}



2. Bezpośredni cyfrowy pomiar częstotliwości

Liczba zliczonych impulsów – (wynik pomiaru częstotliwości):

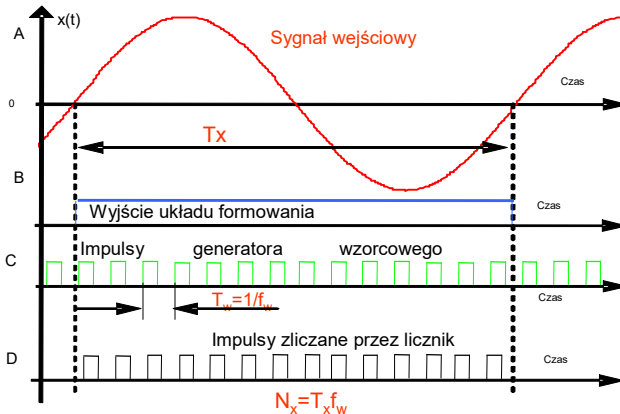


$$N_x = \frac{T_{pom}}{T_x} = T_{pom} \cdot f_x$$

i ona jest proporcjonalną do wartości częstotliwości f_x .

3. Pośredni pomiar częstotliwości (cyfrowy pomiar okresu sygnału)

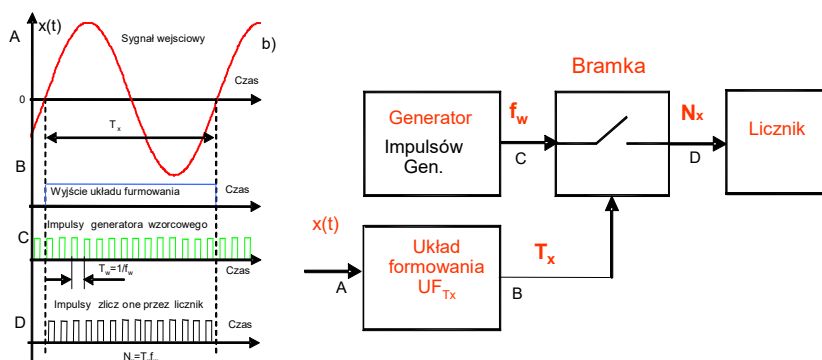
Cyfrowy pomiar okresu polega na jego wstępnym przetwarzaniu w impuls otwierający bramkę tej samej trwałości T_x z następnym zliczaniem (przez licznik) impulsów o wzorcowej (precyzyjnie znanej) częstotliwości f_w .



3. Pośredni pomiar częstotliwości (cyfrowy pomiar okresu sygnału)

W tym celu, podobnie jak poprzednio, wykorzystują się:

- wejściowy układ formowania (UF_{Tx}) oraz
- generator impulsów częstotliwości wzorcowej f_w (Generator impulsów, Gen.)



3. Pośredni pomiar częstotliwości (cyfrowy pomiar okresu sygnału)

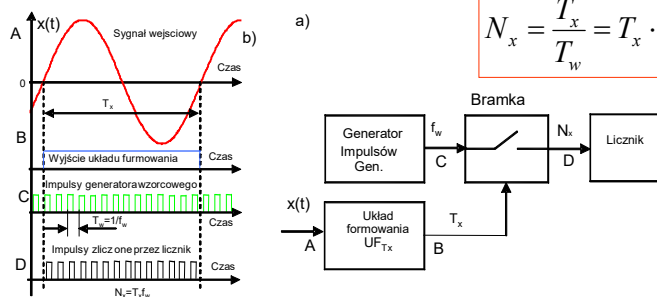
Liczba zliczonych impulsów wynosi:

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

i ona jest proporcjonalną do wartości okresu.

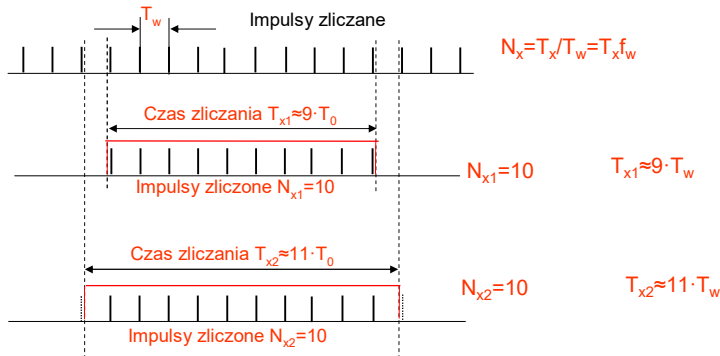
Częstotliwość, jako odwrotność do okresu równa się:

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



4. Błąd i niepewność zliczania podczas pomiaru częstotliwości

Ten sam wynik (liczba zliczonych impulsów $N_{x1}=N_{x2}=10$) może być uzyskany przy różnych wartościach czasu mierzonego $T_{x1} \neq T_{x2}$



4. Błąd i niepewność zliczania podczas pomiaru częstotliwości

Wartość rzeczywista czasu zliczania

$$T_{x1} = 9 \cdot T_0; \quad T_{x2} = 11 \cdot T_0$$

Błąd pomiaru:

Pomiar 1:

$$\Delta T_{m,T1} = T_{m1} - T_{x1} = N_{x1} \cdot T_w - T_{x1} = 10 \cdot T_w - 9 \cdot T_w = T_w$$

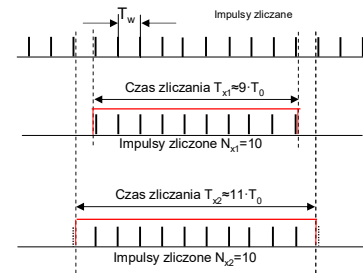
Pomiar 2:

$$\Delta T_{m,T2} = T_{m2} - T_{x2} = N_{x2} \cdot T_w - T_{x2} = 10 \cdot T_w - 11 \cdot T_w = -T_w$$

Wartości graniczne błędu zliczania interwału czasowego:

$$-T_w \leq \Delta_T \leq T_w$$

Lub wartości graniczne błędu zliczania w jednostkach okresu impulsów zliczanych:



$$-1 \leq \Delta_{z,l,T} = \frac{\Delta_T}{T_0} \leq +1$$

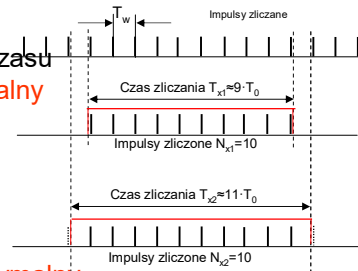
4. Błąd i niepewność zliczania podczas pomiaru częstotliwości

Otóż, w **najgorszym przypadku**, przy braku synchronizacji interwału otwarcia bramki (czasu zliczania) z impulsami zliczanymi, **maksymalny błąd zliczania nie przekracza ± 1 impulsu**:

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

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

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



4. Błąd i niepewność zliczania podczas pomiaru częstotliwości

Bezpośredni pomiar częstotliwości - wartość graniczna względnego błędu kwantowania:

$$\delta_{z,l,gr}(f_x) = \frac{100\%}{N_x} = \frac{100\%}{T_{pom} \cdot f_x}$$

Pośredni pomiar częstotliwości przez pomiar okresu (lub m okresów sygnału) - wartość graniczna względnego błędu kwantowania:

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

Jaka metoda pomiaru lepsza? Bezpośrednia czy pośrednia?

Ta, która zapewni **mniejszy błąd zliczania (kwantowania)**!

Dla „dużych” częstotliwości lepsza metoda bezpośrednia (częstotliwość w mianowniku!),

Dla „małych” częstotliwości lepsza metoda pośrednia (częstotliwość w liczniku)

5. Częstotliwość graniczna

Gdzie granica pomiędzy „dużymi” i „małymi” częstotliwościami?

Częstotliwość graniczna jest częstotliwością sygnału, przy pomiarze której obydwa metodami (bezpośrednią i pośrednią) otrzymują się jednakowe błędy graniczne zliczania:

$$\delta_{zl,gr}(f_{x,gr}) = \delta_{zl,gr}(1/T_{x,gr})$$

$$\frac{100\%}{T_{pom} \cdot f_{x,gr}} = \frac{f_{x,gr} \cdot 100\%}{m \cdot f_{kw}}$$

$$f_{x,gr} = \sqrt{\frac{m \cdot f_{kw}}{T_{pom}}}$$

Jej wartość zależy od **maksymalnej częstotliwości f_{kw}** impulsów generatora zegarowego, **liczby m** mierzonych okresów oraz **maksymalnego czasu pomiaru T_{pom}** .

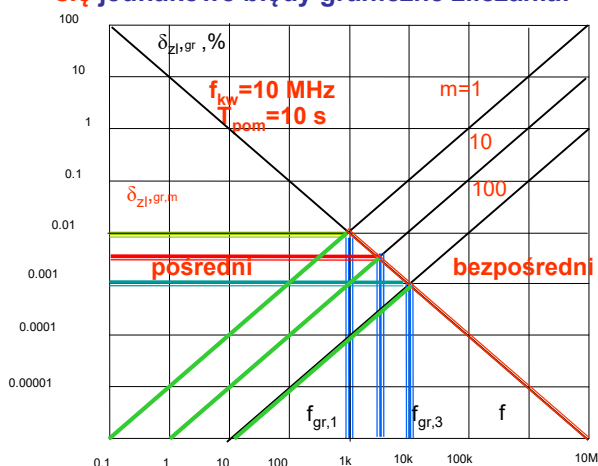
Maksymalny błąd kwantowania osiąga się na częstotliwości granicznej $f_x = f_{x,gr}$ i równa się

$$\delta_{zl,gr}(f_{x,gr}) = \frac{100\%}{\sqrt{m \cdot f_{kw} \cdot T_{pom}}}$$

5. Częstotliwość graniczna

Częstotliwość graniczna jest częstotliwością sygnału, przy pomiarze której obydwa metodami (bezpośrednią i pośrednią) otrzymują się jednakowe błędy graniczne zliczania:

$$f_{x,gr} = \sqrt{\frac{m \cdot f_{kw}}{T_{pom}}}$$



6. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości

W pomiarach cyfrowych często wymagano jest zapewnienie zadanego czasu pomiaru T_{pom} .

Z poprzedniego materiału wynika, że metody bezpośrednia i pośrednia (przez pomiar okresu) zapewniają różne czasy pomiaru częstotliwości przy różnych efektach kwantowania (zliczania) impulsów.

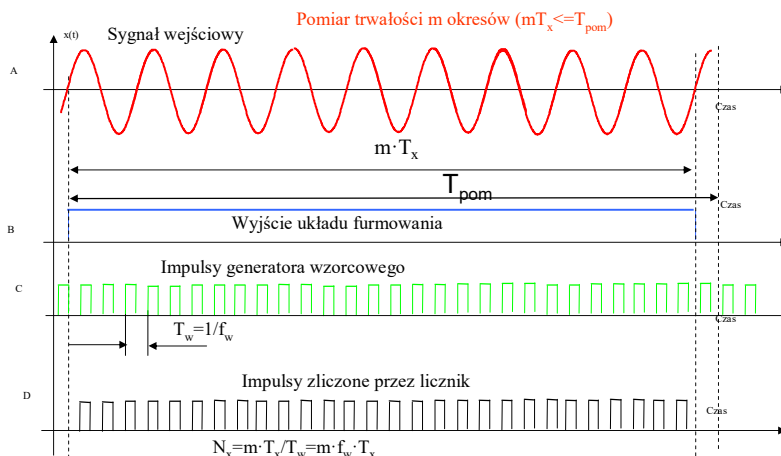
Dla zapewnienia wymagań dotyczących czasu pomiaru różnych częstotliwości w praktyce często wykorzystuje się metoda kombinowana:

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.

6. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości



Wynik pomiaru:

$$N_x = \frac{m \cdot T_x}{T_w} = m \cdot T_x \cdot f_w; \quad f_x = \frac{m f_w}{N_x}$$

6. Metoda pośrednia z zadaniem czasem pomiaru częstotliwości

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

$$\delta_{z,f,gr} = \frac{\Delta_{z,gr}}{N_x} 100\% = \frac{\pm 1}{mT_x f_w} \approx \frac{\pm 1}{T_{pom} f_w} 100\% \quad (10^6 \text{ ppm})$$

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

Okres sygnału w tej metodzie jest równy: $T_x = \frac{N_x}{mf_w}$

Przy tej samej wartości maksymalnego względnego błędu zliczania.

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