

## Jan Ryszard JASIK, Cezary GAPIŃSKI

WYDZIAŁ TELEKOMUNIKACJI, INFORMATYKI I ELEKTROTECHNIKI,  
UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH W BYDGOSZCZY,  
Al. Prof. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

# Mikrokontrolerowe konwertery „częstotliwość – kod” o zwiększonej dokładności

Dr hab. inż. Jan Ryszard JASIK

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (1970 r.). Doktorat uzyskał w Lenińskim Instytucie Politechnicznym w 1979 r. Stopień doktora habilitowanego otrzymał na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej w 2004 r. Zakres jego badań obejmuje problemy przetwarzania sygnałów pomiarowych, konstrukcji systemów pomiarowych z częstotliwościowym nośnikiem informacji, czujników pomiarowych oraz atestacji metrologicznej narzędzi pomiarowych.



e-mail: jasiak@utp.edu.pl

Mgr inż. Cezary GAPIŃSKI

Absolwent studiów magisterskich o kierunku Elektrotechnika na Wydziale Telekomunikacji i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy (2012 r.). Stopień inżyniera uzyskał na kierunku Automatyka i Robotyka Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu w 2010 r. Zawodowo zajmuje się projektowaniem urządzeń elektronicznych, systemów pomiarowych oraz rozwojem oprogramowania dla mikrokontrolerów.



e-mail: cezary.gapinski@gmail.com

### Streszczenie

W artykule przedstawiono nowoczesne metody pomiaru częstotliwości zapewniające zminimalizowanie błędów kwantowania dzięki użyciu zaawansowanych metod pomiarowych, predestynowanych do realizacji komputerowych. Układ zrealizowano przy użyciu 32-bitowego mikrokontrolera STM32F103CBT6 oraz komputera osobistego. Zaprezentowano algorytmy sterujące napisane dla mikrokontrolera w języku C oraz aplikację sterującą w środowisku LabVIEW. Przedstawione wyniki eksperymentu zobrazowały przewagę omówionych nowoczesnych metod w porównaniu do metod klasycznych.

**Słowa kluczowe:** pomiar częstotliwości, metoda synchroniczna, metoda wagowa, mikroprocesorowy pomiar częstotliwości.

## Microcontroller based “frequency to code” converters with increased accuracy

### Abstract

The paper presents modern frequency measurement methods ensuring minimization of the quantization error. The minimization is achieved by using advanced measurement methods predestined for computer realization. The synchronous (Fig. 2) and weight algorithm (Fig. 4) methods are described. The synchronous method decreases the quantization error which is the results of no synchronization between the start and stop gating time  $T_p$  and the first and last impulse formed from the measured frequency signal. For low frequency measurements there was used the weight algorithm. This method guarantees minimization of the quantization error thanks to ascribing the weight coefficients to partial results of the measured  $T_{pi}$  periods that are located inside the multiple  $n$  periods of the measured signal. The paper presents practical realization of the measurement with the constructed measuring system. The system was made by using a 32-bit microcontroller STM32F103CBT6 with counters, DMA and interrupt modules. In the paper there are described the control algorithms in C language for the microcontroller program (Fig. 7) and virtual control panel created in LabVIEW (Fig. 8). The results obtained show the advantages of the discussed methods in comparison to the classical methods (Figs. 10, 11).

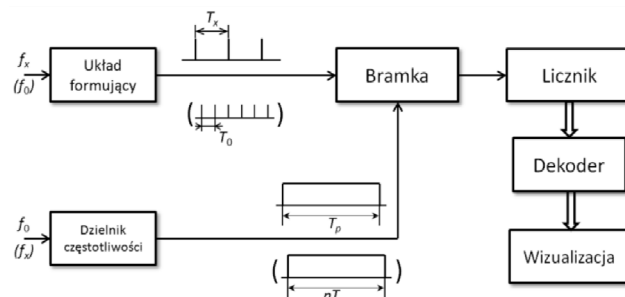
**Keywords:** frequency measurement, synchronous method, weight method, microcontroller based frequency measurement method.

## 1. Wstęp

Konwersja „wielkość fizyczna - częstotliwość” jest obecna we współczesnym sprzęcie pomiarowym, a zastosowanie odpowiedniej metody pomiaru częstotliwości decyduje o dokładności uzyskiwanych wyników. Pomiar częstotliwości wykonywany jest współcześnie poprzez częstotściomierze, budowane przy użyciu analogowych i cyfrowych elementów elektronicznych.

Zasada pomiaru zależy od wartości częstotliwości sygnału mierzonego i polega w ogólności na zliczaniu, odpowiednio uformowanych z sygnału mierzonego impulsów w ściśle określonym czasie  $T_p$  lub zliczaniu impulsów sygnału generatora wzorcowego

o okresie  $T_0$  w czasie trwania okresu  $T_x$  sygnału mierzonego lub jego wielokrotności  $nT_x$  [1].



Rys. 1. Struktura częstotściomierza/czasomierza mierzącego częstotliwość średnią w czasie  $T_p$  [2]

Fig. 1. Block diagram of the frequency/period meter for measuring the average frequency in  $T_p$  time [2]

Wartości zliczonych impulsów w obydwu przypadkach są liczbami całkowitymi i mogą różnić się od liczby okresów przebiegu mierzonego lub wzorcowego, zawartych w obrębie czasu otwarcia bramki  $T_{p1}$  lub czasu  $nT_x$ . Różnica ta, będąca błędem metody, jest nazywana błędem kwantowania.

Postęp w dziedzinie elektroniki i rozwój mikrokontrolerów powoduje wypieranie rozwiązań z użyciem wielu pojedynczych układów elektronicznych. Peryferia zaimplementowane w mikrokontrolerach, sterowane napisanym przez użytkownika programem, ustalają sposób zliczania impulsów sygnału mierzonego i wzorcowego zastępując całkowicie scalone liczniki, układy bramkujące oraz układy sterowania. Dodatkowo umożliwiają komunikację z komputerem i dalszą zaawansowaną analizę danych.

## 2. Zasada pomiaru

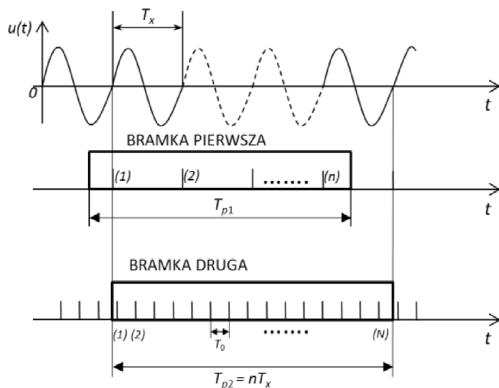
We współczesnej aparaturze do pomiaru częstotliwości dąży się do minimalizacji błędów kwantowania. Zapewniane jest to poprzez użycie zaawansowanych metod pomiarowych, z których dwie przedstawiono poniżej.

### 2.1. Metoda synchroniczna

Metoda synchroniczna (zliczania zależnego) umożliwia zmniejszenie błędów kwantowania wynikającego z braku synchronizmu pomiędzy impulsami o częstotliwości wejściowej, a chwilami otwarcia i zamknięcia bramki.

Zasadę pomiaru przedstawiono na rysunku 2. Niezależnie od ciągu impulsów mierzonych formowany jest impuls bramkujący (BRAMKA PIERWSZA) o czasie trwania  $T_{p1}$ .

Równocześnie formowany jest drugi impuls bramkujący  $T_{p2}$  (BRAMKA DRUGA). Jego początek i koniec jest zsynchronizowany z chwilami pojawiania się impulsów sygnału mierzonej częstotliwości, których liczba  $n$  jest zapamiętywana. Dzięki synchronizacji błąd zaokrąglenia nie występuje [2, 4].

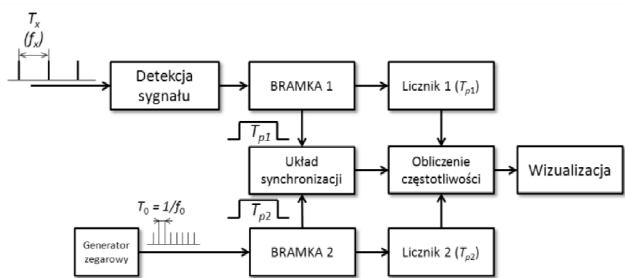


Rys. 2. Przebiegi czasowe ilustrujące pomiar częstotliwości metodą synchroniczną [2]  
 Fig. 2. The synchronous method for determining the frequency [2]

Drugi impuls bramkujący jest wypełniany zliczanymi w liczniku impulsami z generatora zegarowego o wysokiej częstotliwości  $f_0$ , których liczba  $N$  jest zapamiętywana. Częstotliwość mierzona jest obliczana na podstawie zależności [2, 4]:

$$f_x = \frac{n}{N} f_0 \quad (1)$$

Metoda synchroniczna wymaga zastosowania w strukturze częstotliciomierza procesora. Schemat blokowy realizacji przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy częstotliciomierza realizującego metodę synchroniczną  
 Fig. 3. Block diagram for reciprocal (synchronous) counting realization

Maksymalna wartość względnego błędu kwantowania w metodzie synchronicznej jest opisana wzorem (2), z którego wynika, że jego wartość nie zależy od wartości mierzonej częstotliwości i jest stała w całym zakresie pomiarowym:

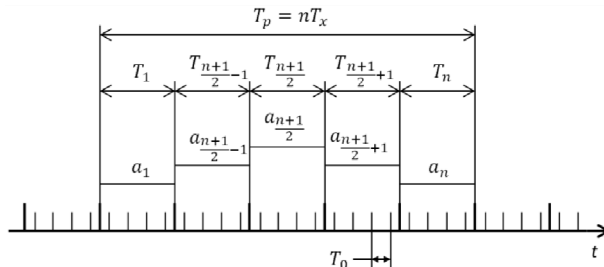
$$\gamma_{kwf} = \pm \frac{T_0}{T_{p1}} = \pm \frac{1}{f_0 T_{p1}} \quad (2)$$

Dzięki zastosowaniu programowej kontroli przepełnień licznika zakres pomiarowy od strony niskich częstotliwości może być praktycznie nieograniczony. Od strony wysokich częstotliwości ograniczeniem jest błąd kwantowania, którego wartość może być zmniejszana poprzez pomiary wielokrotności okresu  $T_{xi}$  i wagowe przetwarzanie wyników [2].

## 2.2. Metoda wagowa

Podczas pomiarów częstotliwości poprzez wyznaczenie odwrotności wielokrotności okresu  $nT_x$  faktycznie ma miejsce pomiar każdego okresu  $T_{xi}$  oddzielnie i sumowanie cząstkowych wyników (rys. 4). O błędzie kwantowania decydują jedynie skła-

dowe leżące na końcach przedziału  $nT_x$ , a błędy pomiarów okresów  $T_{xi}$ , znajdujących się wewnątrz  $nT_x$ , kompensują się. Zauważenie tej właściwości umożliwiło optymalizację znanego dotychczas algorytmu pomiarowego poprzez przyporządkowanie wynikom cząstkowym optymalnych współczynników wagowych [2].



Rys. 4. Ilustracja wagowego sposobu pomiaru częstotliwości [2]  
 Fig. 4. The weighting applied to the frequency measurement algorithm [2]

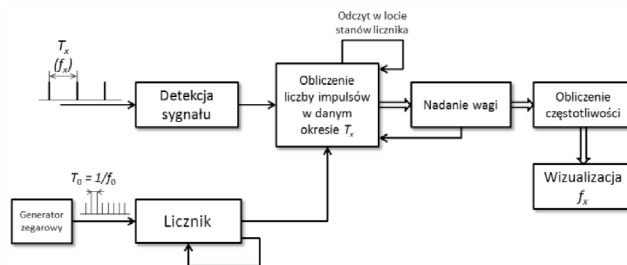
Algorytm polega na odczytywaniu liczby nagromadzonych impulsów sygnału zegarowego o okresie  $T_0$  w chwilach czasowych wyznaczonych przez zbocze narastające bądź opadające sygnału mierzonego. Dane te są używane do obliczania estymaty mierzonej częstotliwości [1]:

$$f_x^* = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^n a_i N_i} f_0 \quad (3)$$

gdzie  $a_i$  to optymalne współczynniki wagowe opisane zależnością:

$$a_i = \frac{6i[n-i+1]}{n} a_1 \quad (4)$$

Z powyższych zależności wynika, że praktyczna realizacja tej metody (rys. 5) ze względu na jej złożoność, jest technicznie i ekonomicznie uzasadniona jedynie wtedy, gdy do wykonywania wszystkich operacji wynikających z algorytmu zostanie użyty mikrokontroler.



Rys. 5. Schemat blokowy częstotliciomierza realizującego metodę wagową  
 Fig. 5. Block diagram for weighting frequency method realization

Mikrokontroler użyty w układzie pomiaru częstotliwości powinien charakteryzować się rozbudowanymi układami licznikowymi oraz detekcją przerw zewnętrznych.

## 3. Realizacja praktyczna konwerterów

Jednym z układów posiadających właściwości wymagane do realizacji konwerterów „częstotliwość - kod” jest 32-bitowy mikrokontroler STM32F103CBT6 firmy ST Microelectronics [3].

Liczniki, w które wyposażony jest mikrokontroler mogą zliczać z maksymalną częstotliwością taktującą do 72 MHz. Tryb kaskadowego łączenia liczników umożliwia pomiar sygnałów o niskiej częstotliwości bez zmniejszenia dokładności uzyskiwanych wyników, przy braku dodatkowej programowej kontroli przepełnień. Mikrokontroler zawiera sterownik przerw NVIC (ang. *Nested Vectored Interrupt Controller*), który poza wygodną obsługą, charakteryzuje się krótkim, do tego przewidywalnym, czasem obsługi przerw, w tym także zgłaszanych równocześnie. Układy peryferyjne w STM32 mogą uzyskiwać bezpośredni dostęp do pamięci

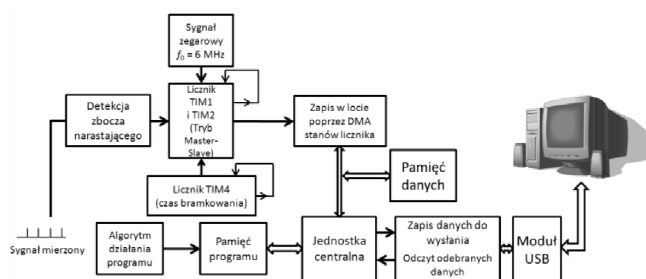
poprzez układ DMA (ang. *Direct Memory Access*) bez udziału jednostki głównej CPU (ang. *Central Processing Unit*) [3].

### 3.1. Układ pomiarowy

Do realizacji omówionych metod pomiarowych w praktyce zbudowano układ pomiarowy składający się z:

- konwertera wykonującego pomiary częstotliwości przy użyciu klasycznych metod pomiarów, metody synchronicznej i metody wagowej,
- testowego generatora częstotliwości,
- komputera z zainstalowaną aplikacją sterującą opracowaną w LabVIEW i komunikującego się z urządzeniami poprzez magistralę USB.

Konwerter, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 6 przeznaczony jest do pomiaru częstotliwości sygnału w standardzie TTL.



Rys. 6. Schemat blokowy konwertera „częstotliwość - kod” zrealizowanego z wykorzystaniem mikrokontrolera STM32F103CBT6

Fig. 6. Block diagram of the “frequency-to-code” converter realized with a STM32F103CBT6 microcontroller

Program sterujący zbieraniem danych opracowano w języku C. Do komunikacji z komputerem osobistym użyty został układ wirtualnego portu szeregowego implementowanego w mikrokontrolerze z użyciem bibliotek programistycznych firmy ST Microelectronics. Udostępniony układ składa się z aplikacji dla mikrokontrolera i sterownika komputera. Po zainstalowaniu sterownika na komputerze, obsługa magistrali USB poprzez środowisko LabVIEW for Windows odbywa się przy użyciu standardowych bloków sterowania portem szeregowym.

Przed rozpoczęciem pomiarów wykonywane jest odpowiednie zainicjowanie mikrokontrolera do pracy. Ustawiany jest układ zegarowy taktujący mikrokontroler, moduł obsługi magistrali USB, układ licznikowy, moduł przerwań, inicjalizacja zmiennych.

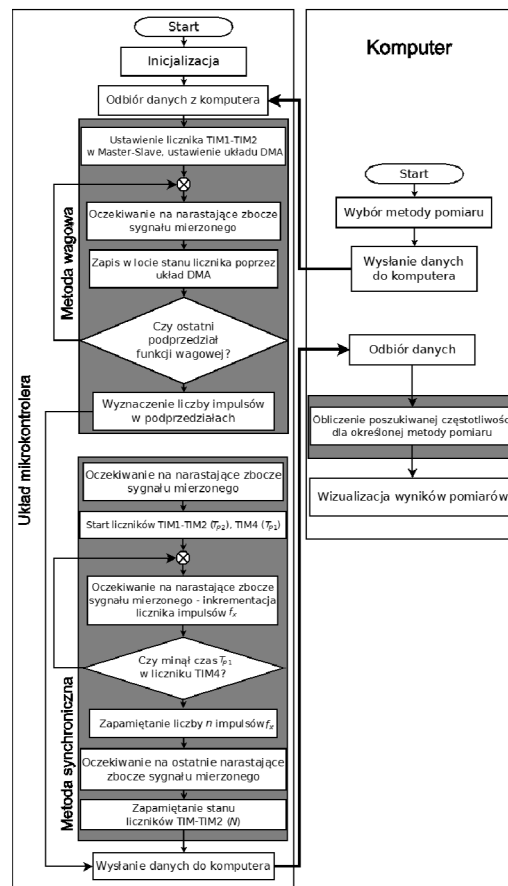
Następnie mikrokontroler oczekuje na polecenie wysłane z panelu czołowego modułu pomiarowego zainstalowanego na komputerze osobistym, po czym następuje wykonanie procedur, zależnych od wybranej metody pomiaru. Po wykonaniu operacji dane są przesyłane do komputera osobistego, gdzie są przetwarzane i wizualizowane (rys. 7).

### 3.2. Realizacja metody synchronicznej

W metodzie tej użyto liczniki TIM1 i TIM2 mikrokontrolera połączone w tryb „Master – Slave” w celu ustalenia liczby impulsów znajdujących się pomiędzy pierwszym impulsem sygnału mierzzonego w czasie pomiaru i ostatnim znajdującym się tuż po czasie pomiaru (czas  $T_{p2}$ ) [3]. Połączenie takie zapewniło dostęp do 32-bitowego wyniku pomiaru, przy częstotliwości  $f_0$  sygnału zegarowego równego 6 MHz. Licznik TIM1 został skonfigurowany do wywoływania przerwania po pojawieniu się impulsu uformowanego sygnału częstotliwości mierzonyj.

Do odmierzenia czasu pomiaru  $T_{p1}$  użyto licznik TIM4. Wartości rejestrów służące do odmierzenia tego odcinka czasu są przesyłane z komputera osobistego. Aktywowane jest również przerwanie od zrównania się zawartości licznika z wartością zadaną, co oznacza odmierzenie ustalonego czasu pomiaru.

Cechą charakterystyczną pracy w tej metodzie jest wyzwolenie synchroniczne liczników TIM1, TIM2 wraz z pojawieniem się pierwszego impulsu sygnału mierzonyj. W przerwaniach licznika TIM1 CCR1 (ang. *Capture Compare Register*) zliczana jest liczba impulsów sygnału mierzonyj. Przerwanie licznika TIM4 powoduje zapamiętanie tej liczby. Kolejne przerwanie TIM1 CCR1 powoduje zapisanie wartości liczników TIM1, TIM2. Przerwanie to powoduje również zakończenie pomiarów i wysłanie zebranych danych do komputera osobistego.



Rys. 7. Algorytm działań mikrokontrolera zaimplementowany w konwerterze

Fig. 7. Sequence of operations of the converter program for frequency measurements

### 3.3. Realizacja metody wagowej

Po odebraniu polecenia z komputera ustawiana jest liczba  $n$  okresów sygnału mierzonyj, jaka będzie przetwarzana podczas pomiaru. Liczniki TIM1 i TIM2 pracujące w trybie „Master – Slave” zliczają wewnętrzny przebieg zegarowy o częstotliwości  $f_0$  równej 6 MHz. Po wykryciu zbocza narastającego na wejściu CCR1 TIM1, poprzez układ DMA, wykonywany jest odczyt „w locie” stanów liczników i zapamiętanie wyników częstotkowych w tablicy zainicjowanej w pamięci RAM.

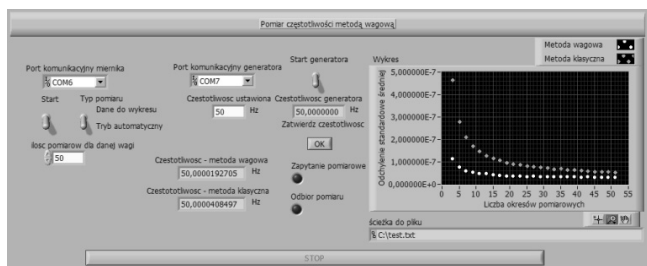
Po wykonaniu wszystkich odczytów wyznaczana jest liczba impulsów  $N_i$  sygnału o częstotliwości  $f_0$  występujących w  $i$ -tym okresie sygnału mierzonyj. Dane zostają wysłane do komputera w odpowiednim formacie ramki. Przy użyciu aplikacji komputerowej są one przetwarzane i obliczany jest wynik końcowy.

### 3.4. Oprogramowanie komputera osobistego

Oprogramowanie komputera osobistego zostało przygotowane przy użyciu środowiska „LabVIEW for Windows”. Komunikacja z modułem pomiarowym została zrealizowana poprzez użycie bloków komunikacyjnych „VISA COM Port”.

Opracowano dwa rodzaje wirtualnych przyrządów pomiarowych. Jeden przeznaczony jest do porównania klasycznej metody pomiaru z czasem bramkowania  $T_p$  z metodą synchroniczną.

Drugi przeznaczony jest do sprawdzenia metody wagowej. Panel czołowy aplikacji dla pomiarów metodą wagową przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Widok aplikacji opracowanej w środowisku LabVIEW do pomiarów częstotliwości metodą wagową

Fig. 8. Front panel of a LabVIEW program for weight frequency measurement

Diagram programu podzielono na dwie części (dwie pętle typu „While”). Pętla „Producenta” odpowiedzialna jest za wykrywanie zdarzeń (do wychwytywania zdarzeń użyto struktury „Event”), natomiast pętla „Konsumenta” jest odpowiedzialna wyłącznie za podejmowanie akcji przypisanym zdarzeniom. Komunikacja pomiędzy pętlami odbywa się za pomocą mechanizmu kolejki, która pozwala na przechowywanie w pamięci elementów jeden po drugim zgodnie z kolejnością ich dodania.

#### 4. Weryfikacja eksperymentalna

W celu przetestowania konwertera zbudowano generator testowy. Jego budowa sprzętowa jak i programowa bazuje na rozwiązaniach zastosowanych w konwerterze. Generator ten dołączony jest poprzez złącze BNC do konwertera. Zbudowane urządzenie ma możliwość generowania sygnału w standardzie TTL o zadanej częstotliwości z wypełnieniem sygnału 50%. Wybrana wartość częstotliwości generowanego sygnału przesyłana jest poprzez aplikację komputerową. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 9.



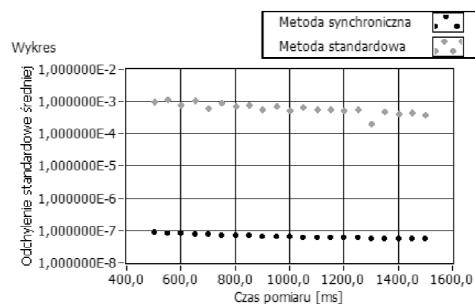
Rys. 9. Widok stanowiska badawczego  
Fig. 9. View of research stand

W celu sprawdzenia działania metod pomiarowych obliczono niepewność dla serii pomiarów. Najlepszym oszacowaniem błędów dla opracowanych metod pomiarowych okazało się odchylenie standardowe średniej  $\bar{\sigma}$  obliczane zgodnie ze wzorem:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_{wz})^2}{n(n-1)}}, \quad (5)$$

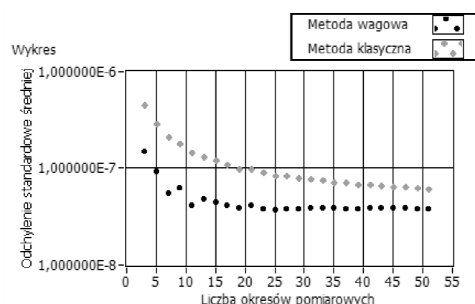
gdzie:  $n$  – liczba pomiarów wielokrotnych,  $f_i$  – wynik pojedynczego pomiaru,  $f_{wz}$  – wartość równa częstotliwości przebiegu wyjściowego testowego generatora częstotliwości.

Dla sprawdzenia metody synchronicznej porównane zostały (rys. 10) wyniki uzyskiwane metodą klasyczną, czyli poprzez zliczenie liczby impulsów sygnału badanego w zadanym czasie  $T_{p0}$  oraz wyniki uzyskane metodą synchroniczną. Pod uwagę wzięto serie pomiarowe składające się z 50 pomiarów dla danego czasu.



Rys. 10. Porównanie odchyłeń standardowych wyników pomiarów częstotliwości 50 Hz uzyskanych metodą synchroniczną i metodą klasyczną  
Fig. 10. Comparison of the standard deviations of measurement results for the synchronous and classical method for frequency 50 Hz

W celu sprawdzenia metody wagowej porównano wyniki uzyskane w przypadku, gdy poszczególnym pomiarom zostają nadane wagi oraz sytuację, gdy zbierana jest jedynie liczba impulsów zegarowych  $f_0$  w wyznaczonej liczbie okresów pomiaru (klasyczna metoda pomiaru okresu). Wyniki przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Porównanie odchyłeń standardowych wyników pomiarów częstotliwości 50 Hz uzyskanych metodą klasyczną i wagową  
Fig. 11. Comparison of the standard deviations of measurement results for the weighting and classical method for frequency 50 Hz

Metoda synchroniczna zapewnia stały błąd w całym zakresie pomiarowym zależny jedynie od czasu pomiaru. Metoda ta może być użyta zarówno do pomiarów częstotliwości wysokich jak i niskich. Metoda synchroniczna zapewnia uzyskanie wyniku opisanego prostszą zależnością.

W metodzie wagowej poszczególnym pomiarom trzeba nadać odpowiednią wagę, wykonać operacje mnożenia i dzielenia wartości wag i liczby impulsów, co wydłuża czas obliczeń. Ponadto, współczynniki wagowe zależą od liczby okresów mierzonego sygnału. Metoda ta zapewnia jednak najmniejszy błąd spośród opisanych metod pomiarowych.

Zbudowany układ umożliwił komunikację z komputerem poprzez popularną magistralę USB. Daje to możliwość zaawansowanego kształtowania właściwości metrologicznych toru pomiarowego.

#### 5. Literatura

- [1] "Fundamentals of the Electronic Counters", Application Note 200 - Electronic Counter Series, Hewlett Packard 1997.
- [2] Jasik J. R. : „Przetwarzanie sygnałów pomiarowych w systemach z częstotliwościowym nośnikiem informacji”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
- [3] Paprocki K. : „Mikrokontrolery SMT32 w praktyce”, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2009.
- [4] Świsulski D., Pawłowski E., Porzeziński P. : „Metoda zliczania zależnego w pomiarach i rejestracji prędkości obrotowej. Część 1-Zasada pomiaru.”, „Elektronizacja”, 11/1999, s.14-17, Wydawnictwo SIG-MA-NOT, Warszawa 1999.