

KOMPUTEROWY SYSTEM DO SPRAWDZANIA CZĘSTOŚCIOMIERZY CYFROWYCH

dr inż. Eligiusz Pawłowski¹

STRESZCZENIE

W pracy przedstawia się schemat blokowy układu pomiarowego oraz sposób przetwarzania danych umożliwiające sprawdzanie generatorów częstotliwości wzorcowych. Algorytm przetwarzania danych wykorzystuje metodę najmniejszych kwadratów. Prezentuje się wyniki pomiarów zrealizowanych w rzeczywistych układach.

ABSTRACT

This paper presents block diagram of the measurements circuits and data processing for calibration time-base oscillators of universal electronic counters. The proposed method is based on the least error squares fitting technique. The algorithm was tested using data recorded from real frequency sources.

1. WPROWADZENIE

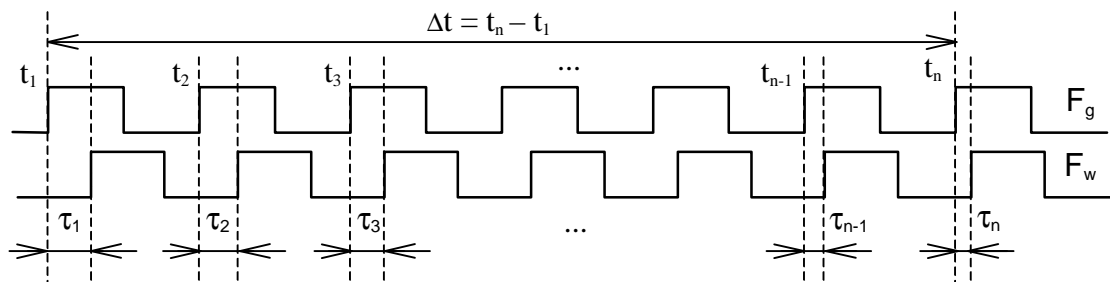
Częstościomierz cyfrowy stanowi współcześnie podstawowy przyrząd do pomiaru częstotliwości i czasu. O dokładności realizowanych za jego pomocą pomiarów decyduje w znaczącym stopniu zastosowany w nim generator częstotliwości wzorcowej. Generatory częstotliwości wzorcowych powszechnie stosowane obecnie w częstościomierzach cyfrowych wykorzystują rezonator kwarcowy i posiadają parametry etalonu III rzędu wystarczające w praktyce do większości zastosowań [1], [6]. Ze względu na dryft długoterminowy i efekty starzenia rezonatora kwarcowego konieczne jest okresowe sprawdzanie parametrów generatora. Zalecana jest do tego celu fazowa metoda porównania częstotliwości sprawdzanego generatora z częstotliwością generatora wzorcowego wyższego rzędu [2], [6], [7]. Metoda ta zapewnia wysokie dokładności porównania, jest jednak stosunkowo uciążliwa w stosowaniu ze względu na sposób wykonywania pomiarów i opracowywania wyników. Zastosowanie komputera umożliwia automatyzację niezbędnych pomiarów oraz realizację bardziej zaawansowanych algorytmów obliczeń dających precyzyjniejsze wyniki.

2. FAZOWA METODA PORÓWNYWANIA CZĘSTOTLIWOŚCI

Fazowa metoda porównania częstotliwości zalecana jest do sprawdzania generatorów wzorcowych przez przepisy krajowe [6] i innych państw [2]. Zasadę pomiaru ilustrują przebiegi czasowe przedstawione na rys.1. W kolejnych chwilach czasowych t_1, t_2, \dots, t_n dokonuje się pomiaru czasów $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ pomiędzy kolejnymi narastającymi zboczami sygnału generatora wzorcowego o częstotliwości F_w i sprawdzanego o częstotliwości F_g .

¹ Katedra Automatyki i Metrologii Politechniki Lubelskiej

Kolejne wartości czasów $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ reprezentują zmianę fazy φ sygnału generatora sprawdzanego względem sygnału wzorcowego.



Rys.1. Przebiegi czasowe w metodzie fazowej porównania częstotliwości

Niezbędnym warunkiem dokonania pomiaru i obliczeń jest: $F_g \cong F_w$. Względne odstrojenie δF_g częstotliwości generatora sprawdzanego F_g od częstotliwości generatora wzorcowego F_w wyższego rzędu zgodnie z instrukcją [6] należy obliczać wg wzoru (1):

$$\delta F_g = \frac{\Delta F_g}{F_g} = \frac{F_g - F_w}{F_g} = \frac{\Delta \tau}{\Delta t} = \frac{\tau_n - \tau_1}{t_n - t_1}. \quad (1)$$

3. ALGORYTM PRZETWARZANIA DANYCH POMIAROWYCH

Na podstawie otrzymanych z pomiarów wartości czasów $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ wyznaczonych w chwilach t_1, t_2, \dots, t_n należy obliczyć względne odstrojenie sprawdzanego generatora δF_g . Zasadę tych obliczeń zilustrowano na rys.2. Zgodnie ze wzorem (1) instrukcja [6] przewiduje uwzględnienie w obliczeniach jedynie wyników pomiarów wykonanych w chwili początkowej t_1 i końcowej t_n , z pominięciem wyników pośrednich, których w takim przypadku można nie wykonywać. Przy stałej wartości odstrojenia δF_g faza φ jest liniową funkcją czasu t , a wykres wartości czasów $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ względem t_1, t_2, \dots, t_n można aproksymować linią prostą $y=ax+b$. W takim przypadku współczynnik kierunkowy a prostej aproksymującej jest równy względnemu odstrojeniu δF_g :

$$a = \delta F_g = \frac{\Delta \tau}{\Delta t}. \quad (2)$$

W praktyce jednak częstotliwość F_g generatora podlega fluktuacjom i wynik (2) obliczony na podstawie tylko skrajnych pomiarów może znacznie odbiegać od rzeczywistości. Lepsze rezultaty można uzyskać uwzględniając wyniki wszystkich pomiarów, aproksymując je linią prostą $y=a'x+b'$ (rys.2). Otrzymana w ten sposób wartość a' jest wartością średnią odstrojenia δF_g za czas pomiaru. Wyraz wolny b' w realizowanych pomiarach jest bez znaczenia i nie ma potrzeby jego wyznaczania. Współczynnik kierunkowy a' linii prostej $y=a'x+b'$ aproksymującej zbiór danych pomiarowych zawierający n par liczb x_i, y_i może być wyznaczony metodą najmniejszych kwadratów wg znanej zależności (3):

$$a' = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} . \quad (3)$$

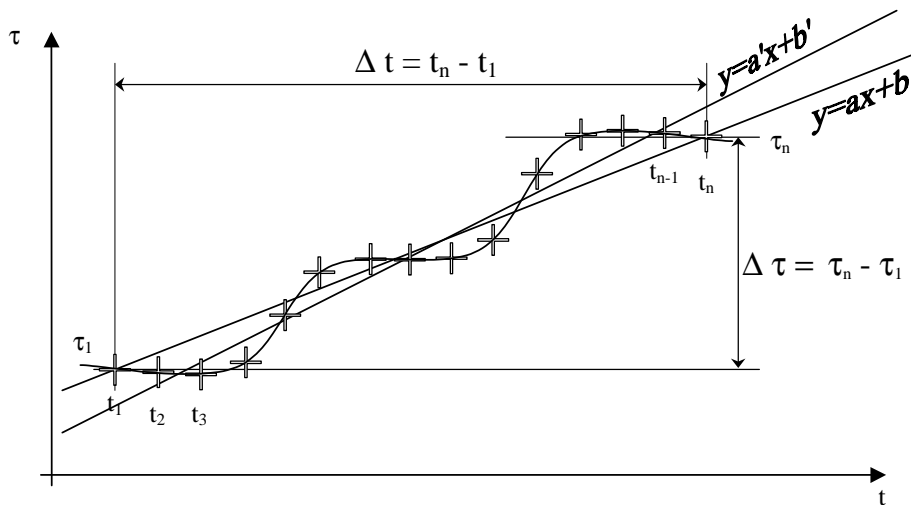
Uwzględniając że w rozpatrywanych pomiarach wartości x_i są równe kolejnym wartościom t_1, t_2, \dots, t_n , równo odległym od siebie o okres sygnału wzorcowego T_w , a wartości y_i są równe kolejnym wartościom zmierzonych w układzie czasów $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$:

$$x_i = i T_w , \quad y_i = \tau_i , \quad (4)$$

oraz stosując znane wzory na sumy szeregów liczbowych skończonych, po odpowiednich przekształceniach [4] poszukiwany współczynnik kierunkowy a' prostej aproksymującej, równy względnemu odstrojeniu sprawdzanego generatora δF_g (2) można przedstawić jako:

$$a' = \delta F_g = \frac{\Delta F_g}{F_w} = \frac{1}{T_w} \frac{6}{n(n+1)(n-1)} \sum_{i=1}^n (2i-n-1)\tau_i . \quad (5)$$

Niezbędne obliczenia prowadzą się więc do zsumowania z odpowiednimi wagami wszystkich kolejnych wartości zmierzonych w układzie czasów $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ i przemnożeniu tak uzyskanej sumy przez ułamek uwzględniający liczbę wykonanych pomiarów n oraz okres sygnału wzorcowego T_w .



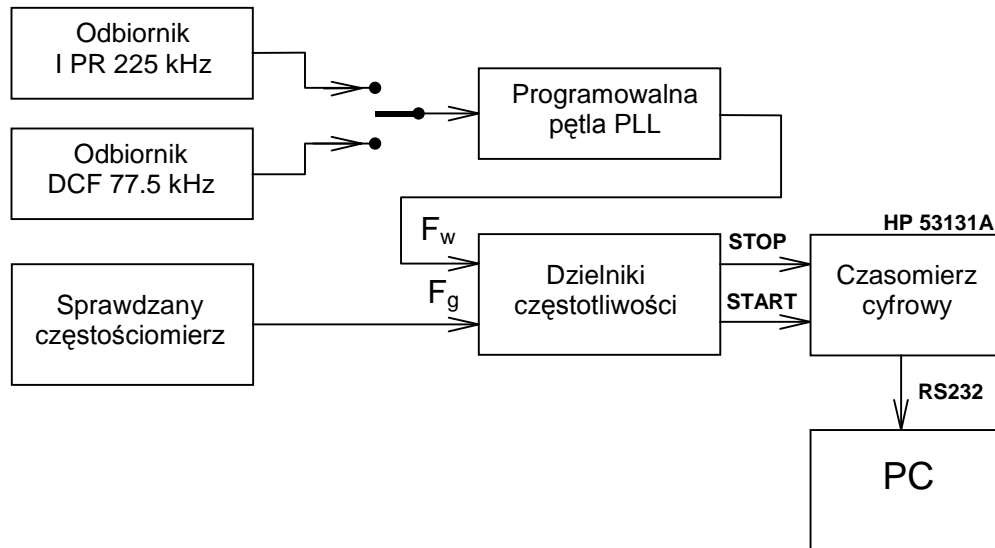
Rys.2. Zasada wyznaczania względnego odstrojenia δF_g w metodzie fazowej porównania częstotliwości

4. ZREALIZOWANY UKŁAD POMIAROWY

Wykonanie pomiarów niezbędnych do realizacji algorytmu przedstawionego zależnością (5) wymaga zastosowania komputera sterującego układem pomiarowym, gwarantującego zapamiętywanie wszystkich wyników pomiaru czasów $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ w chwilach t_1, t_2, \dots, t_n oraz realizującego konieczne obliczenia.

Układ pomiarowy, którego schemat blokowy przedstawiony jest na rys.3, zrealizowano w oparciu o uniwersalny licznik HP53131A zaprogramowany do pomiarów czasu pomiędzy

narastającymi zboczami sygnałów podanych do jego wejść. Czasomierz dołączony jest do komputera klasy PC poprzez interfejs RS232. Niezbędny do realizacji pomiarów sygnał częstotliwości wzorcowej F_w uzyskiwany jest z odpowiedniego odbiornika radiowego [3], [4], [5]. Na potrzeby układu zbudowano dwa odbiorniki: Krajowej Częstotliwości Wzorcowej 225 kHz nadawanej na fali nośnej I programu Polskiego Radia oraz częstotliwości wzorcowej niemieckiego nadajnika DCF 77,5 kHz kontrolowanego przez PTB [5]. W obu przypadkach dostępny jest sygnał częstotliwości wzorcowej spełniający wymagania etalonu II rzędu [7].



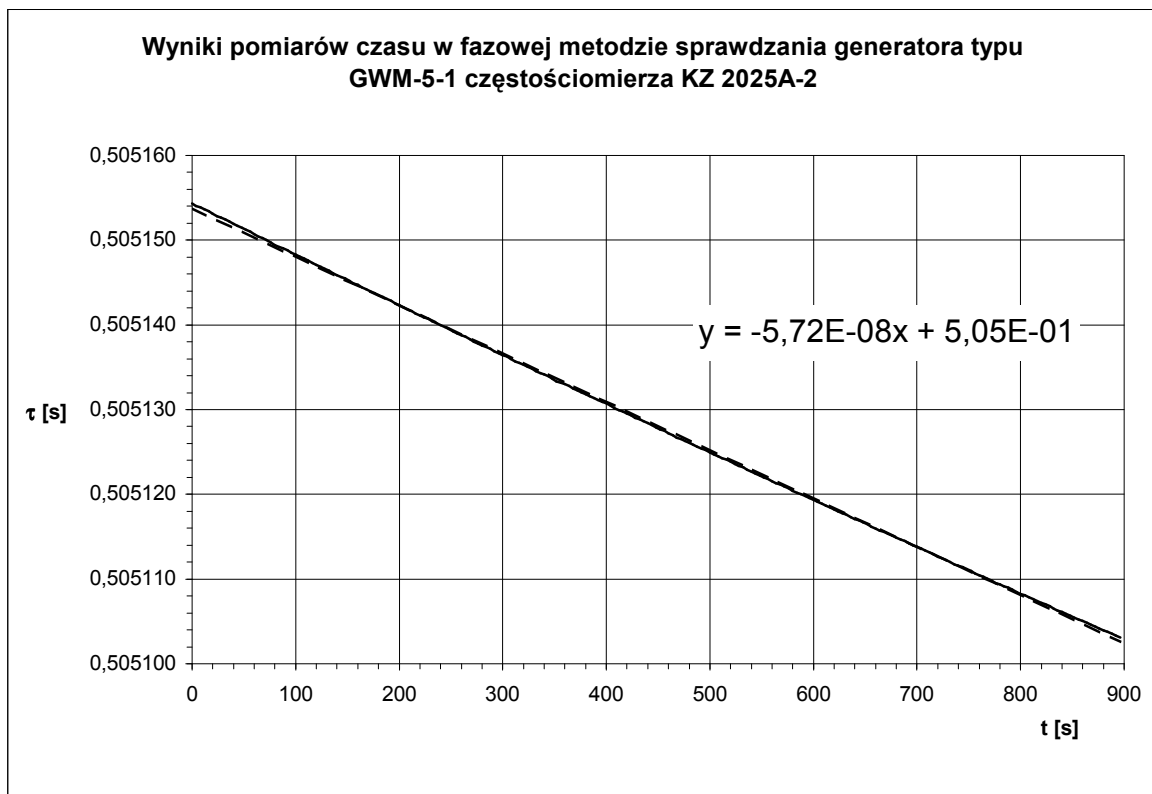
Rys.3. Schemat blokowy układu pomiarowego do fazowej metody porównywania częstotliwości

Wybrany do stosowania sygnał częstotliwości wzorcowej F_w podany jest następnie do mikroprocesorowej pętli PLL, której zadaniem jest poprawa jakości odebranego sygnału radiowego oraz jego ciągła kontrola. W przypadku wystąpienia zaników sygnału i chwilowego rozsynchronizowania się pętli, stan ten jest zapamiętywany i sygnalizowany operatorowi systemu w celu umożliwienia powtórzenia pomiarów. Zbudowany układ pętli PLL zrealizowany jest w oparciu o sterowany napięciowo generator kwarcowy VCXO i zespół liczników programowalnych I-8253 sterowanych mikroprocesorem AT89C2051. Układ kontroli synchronizacji sprawdza pojawianie się naprzemiennie zboczy sygnałów na obu wejściach detektora fazy, co świadczy o poprawnej synchronizacji pętli.

Kolejnym elementem układu są programowalne dzielniki częstotliwości, których zadaniem jest podzielenie częstotliwości wzorcowej F_w i częstotliwości sprawdzanego generatora F_g do takiej samej wartości 1 Hz. Zbudowany układ dzielników częstotliwości zawiera dwa takie same toru zrealizowane z liczników I-8253, sterowanych mikroprocesorem AT90S8535. Każdy z torów ma programowalny niezależnie stopień podziału tak, aby możliwe było uzyskanie na obu ich wyjściach tej samej częstotliwości 1 Hz, niezależnie od wartości częstotliwości wzorcowej F_w i sprawdzanej F_g . Podzielony do 1 Hz sygnał częstotliwości sprawdzanej F_g dołączony jest do wejścia 1 (START) czasomierza i jego narastające zbocza rozpoczynają pomiar czasu. Podobnie, podzielony do 1 Hz sygnał częstotliwości wzorcowej F_w dołączony jest do wejścia 2 (STOP) czasomierza i jego narastające zbocza kończą pomiar czasu. Wszystkie kolejne wyniki pomiarów czasów $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ odczytywane są poprzez interfejs RS232 do komputera PC i przypisane kolejnym chwilom czasowym t_1, t_2, \dots, t_n równo odległym od siebie o jeden okres sygnału wzorcowego T_w . Wyniki te są zapamiętywane i po zakończeniu procedury pomiarów przeprowadzane są obliczenia według przedstawionego wcześniej algorytmu.

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW

Na rys.4 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów uzyskane w omawianym układzie podczas sprawdzania generatora wzorcowego GWM-5-1 częstotliwościomierza cyfrowego KZ 2025A. Generator ten powinien spełniać wymagania etalonu III rzędu. Przepisy [6] określają maksymalne względne odstrojenie częstotliwości dla takiego generatora na $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Jako źródło częstotliwości wzorcowej wykorzystano odbiornik Krajowej Częstotliwości Wzorcowej 225 kHz [3], który zgodnie z przepisami [7] jest w Kraju etalonem II rzędu. Wykonano łącznie 900 pomiarów co 1 sekundę, co trwało 15 minut. Czasomierz cyfrowy HP53131A realizował pomiary czasu z rozdzielczością 100 ns. Uzyskane wyniki pomiarów czasów τ_i , reprezentujące zmianę fazy sygnału generatora sprawdzanego względem wzorca w kolejnych chwilach t_i , przedstawia linia ciągła na rys.4. Linią przerywaną przedstawiono prostą aproksymującą uzyskane wyniki pomiarów. Wyznaczony według zależności (5) współczynnik a' nachylenia prostej aproksymującej ma wartość $-5,72 \times 10^{-8}$ i jest równy względnemu odstrojeniu δF_g sprawdzanego generatora od wzorca. Z porównania wynika, że wartość omawianego parametru dla sprawdzanego generatora nie przekracza wartości dopuszczalnej $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ [6].



Rys.4. Wyniki pomiarów otrzymane metodą fazowego porównania częstotliwości

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony układ pomiarowy realizuje zalecaną w kraju [6] i za granicą [2] metodę fazową porównania częstotliwości umożliwiającą sprawdzanie generatorów wzorcowych – etalonów III rzędu. Zastosowany algorytm przetwarzania danych wykorzystuje wyniki z serii pomiarów wykonanych w równych odstępach czasu i wyznacza metodą najmniejszych kwadratów względne odstrojenie sprawdzanego generatora względem generatora

wzorcowego. Układ pomiarowy bazuje na firmowym czasomierzu cyfrowym HP53131A oraz wykorzystuje zbudowane na jego potrzeby odbiorniki częstotliwości wzorcowych (I PR 225 kHz i DCF 77,5 kHz), mikroprocesorową pętlę PLL oraz programowalne dzielniki częstotliwości. Pracą układu pomiarowego steruje komputer klasy PC połączony interfejsem RS232 z czasomierzem cyfrowym. Odbiorniki radiowe dostarczają sygnał częstotliwości wzorcowej spełniający wymagania etalonu II rzędu [3]. Przedstawione przykładowe wyniki pomiarów potwierdzają praktyczną przydatność zrealizowanego układu.

LITERATURA

- [1] Kartaschoff P.: *Częstotliwość i czas*; WkiŁ; Warszawa, 1985.
- [2] Lombardi M.: *An Introduction to Frequency Calibrations*; Time and Frequency Division, NIST, USA.
- [3] Pawłowski E.: *Odbiór radiowych sygnałów częstotliwości wzorcowych i ich zastosowania*; XXXII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM 2000, Rzeszów-Jawor, 11-15.09.2000, wyd. Politechniki Rzeszowskiej, str. 479-484.
- [4] Pawłowski E.: *Wspomagane komputerowo sprawdzanie generatorów częstotliwości wzorcowych*; V Szkoła-Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK 2001, Rynia k/Warszawy, 21-24.05.2001, wyd. SOWA Sp. z o. o., str. 67-72.
- [5] Pawłowski E., Referowski L., Świsulski D.: *Sprawdzanie częstościomierzy cyfrowych w układzie z odbiornikiem częstotliwości wzorcowej DCF77*; III Seminarium Naukowe: Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki WZEE 2002, Częstochowa-Złoty Potok, 27-29.05.2002, wyd. SIGMA NOT, Przegląd Elektrotechniczny Nr 5s'2002, rok LXXVII, str. 163-167.
- [6] PKNMiJ: *Instrukcja o sprawdzaniu generatorów częstotliwości wzorcowych III rzędu*; Dziennik Normalizacji i Miar nr 18 / 1976, poz. 59
- [7] PKNMiJ: *Układ sprawdzeń narzędzi do pomiarów czasu i częstotliwości*; Dziennik Normalizacji i Miar nr 13 / 1982, poz. 26