

## ANALIZA BŁĘDU POMIARU CZĘSTOTLIWOŚCI TERMOMETRU KWARCOWEGO

Volodymyr KOTLIAROV<sup>1</sup>, Pylyp SKOROPAD<sup>2</sup>

1. Lviv Polytechnic National University, Department of Information Measuring Technology  
tel.: +380632677355 e-mail: cellist.v@gmail.com
2. Lviv Polytechnic National University, Department of Information Measuring Technology  
tel.: +380975886553 e-mail: skorfil@mail.ru

**Streszczenie:** Dokonano analizy problematyki pomiaru temperatury termometrami kwarcowymi. Zaproponowano sposób zmniejszania częstotliwości roboczej termometru, co daje możliwość istotnego zwiększenia względnej czułości, zmniejszenia bezwzględnego błędu pomiaru temperatury, a także umożliwia optymalizację wytycznych do konstruowania termometru.

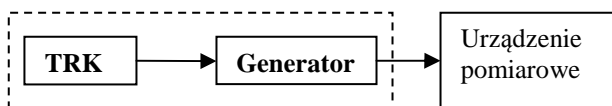
**Słowa kluczowe:** termometr kwarcowy, częstotliwość, czułość, mikser.

## 1. WPROWADZENIE

Jak wiadomo, bezpośrednia metoda pomiaru częstotliwości polega na zliczaniu impulsów sygnału mierzonego w jednostce czasu [1]. W tym przypadku błąd pomiaru będzie wynosić  $\pm 1$  Hz dla czasu pomiaru 1 s. Stwierdzono, że błąd ten występuje w urządzeniach pomiarowych, które dokonują pomiarów częstotliwości termoczulych rezonatorów kwarcowych (TRK) i konwertują je w temperaturę (rys. 1). W tym przypadku błąd pomiaru temperatury określa się według wzoru [2]:

$$\Delta\theta_f = \pm \frac{\Delta f}{S}, \quad (1)$$

gdzie:  $S$  – czułość TRK (Hz/K),  $\Delta f$  – bezwzględny błąd pomiaru częstotliwości (Hz).



Rys. 1. Schemat blokowy termometru z bezpośrednim pomiarem częstotliwości TRK

W przypadku, gdy  $\Delta f = \pm 1$  Hz i  $S = 200$  Hz/K, błąd instrumentalny urządzenia pomiarowego wynosi  $\pm 0,005$  K, co jest o rząd wielkości mniejsze, niż błąd aktualnie dostępnych urządzeń pomiarowych (typowa wartość błędu bezwzględnego TRK wynosi około  $\pm 0,05$  K [3]).

## 2. ANALIZA TEORETYCZNA PROBLEMU

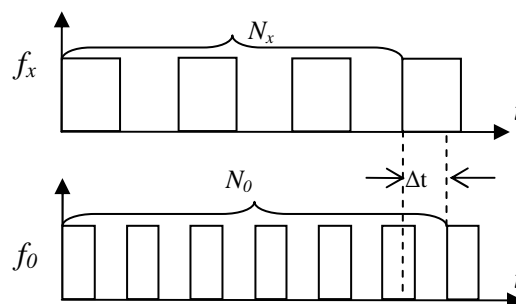
Ostatnio coraz więcej wymaga się TRK o rozdzielczości  $\pm 0,01$  K i wyższej (do  $\pm 0,0001$  K) i stabilności  $\pm (0,05 \dots 0,01)$  K [4], a więc występuje potrzeba

poprawy charakterystyk metrologicznych urządzeń pomiarowych, stosowanych w dziedzinie termometrii kwarcowej. Szczególnie chodzi o zmniejszenie bezwzględnego błędu pomiaru częstotliwości TRK ( $\Delta f$ ). Jedną z metod polega nie na pomiarze częstotliwości sygnału, lecz interwału czasu, w którym mieści się pewna, z góry określona liczba okresów mierzonego sygnału  $N_x$  [5]. Zapewnia to wyższą dokładność w stosunku do klasycznej metody pomiaru częstotliwości. Wtedy częstotliwość określa się na podstawie zależności:

$$f_x = \frac{f_0 \cdot N_x}{N_0}, \quad (2)$$

gdzie:  $f_x$  – mierzona częstotliwość;  $f_0$  – częstotliwość odniesienia;  $N_0$  – liczba okresów częstotliwości odniesienia.

Wykresy czasowe sygnału pomiarowego i sygnału odniesienia przedstawione są na rys. 2.



Rys. 2. Pomiar częstotliwości według metody pomiaru interwału czasowego

W tym przypadku graniczny błąd pomiaru częstotliwości określany jest według wzoru:

$$\Delta f_x = \frac{f_x}{f_0} \Delta f_0 + \frac{f_x}{f_0 \cdot t_{mierz}} \cdot \Delta N_0, \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta f_0$  – błąd częstotliwości odniesienia;  $t_{mierz}$  – czas pomiaru;  $\Delta N_0$  – błąd kwantowania przy cyfrowym pomiarze czasu, równy  $\pm 1$  impuls i spowodowany niesynchronizacją częstotliwości mierzonej  $f_x$  i częstotliwości odniesienia  $f_0$  [6].

Czas pomiaru wyznacza się jako:

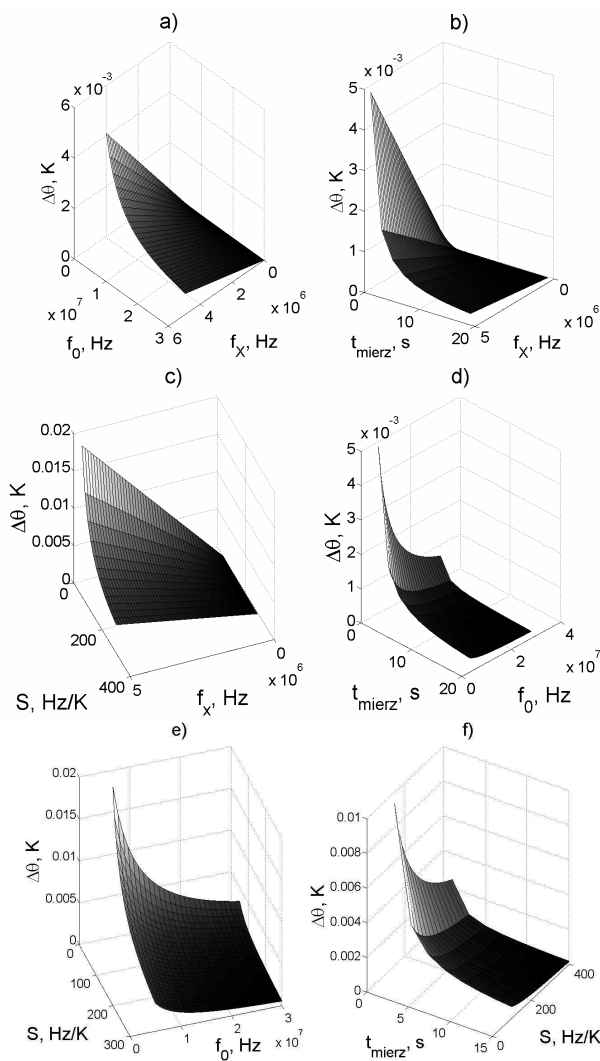
$$t_{mierz} = T_0 \cdot N_0, \quad (4)$$

gdzie:  $T_0$  – czas trwania okresu.

Podstawiając (3) do (1) otrzymujemy model matematyczny błędu pomiaru temperatury:

$$\Delta\theta_f = \pm \left( \frac{f_x}{f_0 \cdot S} \cdot \Delta f_0 + \frac{f_x}{f_0 \cdot t_{mierz} \cdot S} \cdot \Delta N_0 \right). \quad (5)$$

Dokonana analiza wykazała wpływ każdego ze składników na wartość błędu całkowitego (rys. 3).



Rys. 3. Wykresy zależności błędu pomiaru temperatury od: a) - mierzonej częstotliwości  $f_x$  i częstotliwości odniesienia  $f_0$ ; b) - mierzonej częstotliwości  $f_x$  i czasu pomiaru  $t_{mierz}$ ; c) - mierzonej częstotliwości  $f_x$  i czułości  $S$ ; d) - czasu pomiaru  $t_{mierz}$  i częstotliwości odniesienia  $f_0$ ; e) - czułości  $S$  i częstotliwości odniesienia  $f_0$ ; f) - czasu pomiaru  $t_{mierz}$  i czułości  $S$

Granice badania każdego poszczególnego składnika wybrano w następujący sposób. Typowy czas pomiaru 1 sekunda. Maksymalny – 10 sekund. W dowolnym przypadku jest to wystarczające, aby uzyskać najdokładniejsze wyniki.

Typowa częstotliwość badanego TRK przy  $0^\circ\text{C}$  – 5 MHz. Przy czułości 200 Hz/K zakres pomiaru ( $-60 \dots +120^\circ$ ) C, maksymalna i minimalna częstotliwość  $f_x$  nie będzie szczególnie różniła się od częstotliwości zerowej.

Zakres częstotliwości  $f_0$  wybranej od współmiernej do  $f_x$  i wyżej - do momentu, gdy nie będzie miała wpływu na błąd.

Zakres zmiany wrażliwości  $S$  wybrano w okolicach 200 Hz/K, w granicach, w jakich ma ona wpływ na błąd.

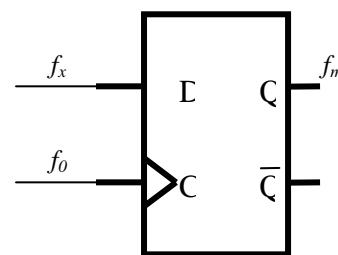
Tak więc, w celu obniżenia wartości granicznego błędu pomiaru temperatury jest niezbędne:

- zmniejszenie częstotliwości mierzonej  $f_x$ ;
- zwiększenie częstotliwości odniesienia  $f_0$ ;
- zwiększenie czasu pomiaru  $t_{mierz}$ ;
- zwiększenie czułości TRK  $S$ .

Analiza wykazała, jakie parametry najbardziej wpływają na błąd:  $f_x, f_0$ , a także czas pomiaru  $t_{mierz}$  (wykresy b i d).

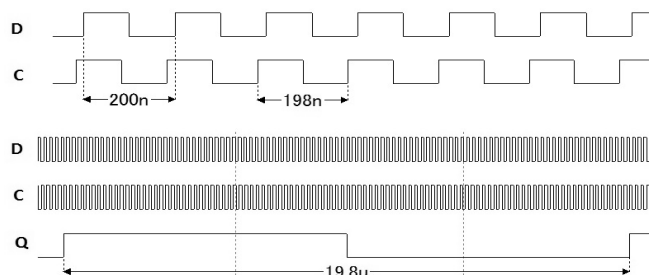
Zwiększenie częstotliwości odniesienia  $f_0$  technicznie jest trudne do zrealizowania (ma ona być o rząd wielkości większą od  $f_x$ , a więc powinna wynosić setki MHz), zwiększenie czasu pomiaru  $t_{mierz}$  też nie jest optymalnym zabiegiem, szczególnie gdy zachodzi potrzeba wielokrotnych pomiarów, a czułość  $S$  w ogóle nie da się zmienić, ponieważ jej wartość jest ustalona w trakcie produkcji.

Optymalne rozwiązanie tego problemu polega na zmniejszeniu częstotliwości mierzonej  $f_x$ , co można osiągnąć wskutek mieszania częstotliwości własnej TRK i częstotliwości  $f_0$ . Bardzo prosty sposób realizacji miksera to użycie przerzutnika typu D [7]. Na wyjściu Q otrzymamy różnicę dwóch częstotliwości.



Rys. 4. Realizacja miksera na przerzutniku typu D

Na przykład, jeśli na jedno z wejść podać sygnał z okresem 200 ns (5 MHz), a na inny - 198 ns (w przybliżeniu 5,05 MHz), na wyjściu Q otrzymamy sygnał z okresem 19,8  $\mu\text{s}$  (w przybliżeniu 50 kHz) (rys. 5).



Rys. 5. Wykres czasowy pracy miksera

Przy użyciu miksera, licznik, który zlicza impulsy bezpośrednio z TRK, będzie liczył impulsy z wyjścia Q, czyli wyjściową częstotliwość miksera akceptujemy jako  $f_x$ .

W tym przypadku częstotliwość impulsów wejściowych powinna być stała, a jej wartość ma być większa, niż częstotliwość TRK przy maksymalnej wartości mierzonej temperatury:

$$f_m = f_x = f_0 - f_{TRK} = f_0 - (f_{TRK0} + S \cdot \theta_{TRK}), \quad (6)$$

gdzie:  $f_m$  – częstotliwość miksera,  $f_0$  – częstotliwość odniesienia (stała).

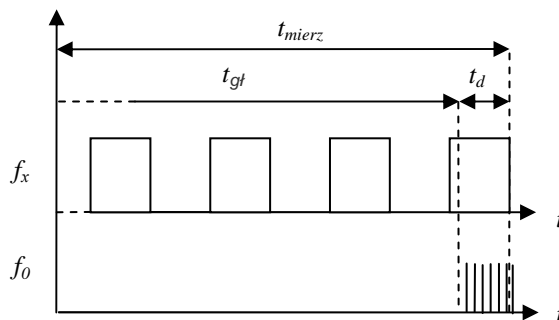
Jak wynika z (5), czułość TRK nie zmienia się, a mierzona częstotliwość przy tym zmniejsza się.

Jeszcze jedną funkcją stosowania miksera jest optymalizacja czasu pomiaru.

Metoda 5 ma następną właściwość. Ponieważ częstotliwość mierzona  $f_x$  jest proporcjonalna do mierzonej temperatury, to przy zadanej liczbie impulsów  $t_{mierz}$  również się zmienia. W skrajnych punktach zakresu pomiaru  $t_{mierz}$  może istotnie się różnić. Indywidualny dobór  $t_{mierz}$  skomplikuje algorytm pomiaru, a jeśli zadać wartość maksymalną  $t_{mierz}$ , to przy najwyższej częstotliwości zwiększa się czas oczekiwania następnego pomiaru. Między cyklami pomiaru powstają niepożądane przerwy, które hamują proces pomiaru.

W takim wypadku trzeba modernizować metodę, rozdzielając  $t_{mierz}$  na dwa składniki. Zadać główny czas pomiaru  $t_{gt}$  (na przykład, 1 s), podczas którego licznik będzie liczył impulsy z wyjścia Q miksera. Po tym musi włączyć się licznik dodatkowy, który zlicza impulsy  $f_0$  w czasie dodatkowym  $t_d$ . Będzie to odbywało się do tego momentu, kiedy na głównym liczniku nie zakończy się okres (rys. 6). Jak widać z rysunku, precyzja wyznaczenia czasu  $t_d$  zależy od częstotliwości odniesienia  $f_0$ .

Algorytm taki można zrealizować za pomocą mikrokontrolera lub prostych układów cyfrowych.



Rys. 6. Wykres czasowy modyfikowanego algorytmu wyznaczenia  $t_{mierz}$

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie wyżej przedstawionych rozwiązań zaproponowano sposób zmniejszenia bezwzględnego błędu pomiaru temperatury, polegający na zmniejszeniu częstotliwości wyjściowej termometru kwarcowego. Również zaproponowany sposób nie potrzebuje zwiększania czasu pomiaru, a czułość, względem błędu  $\Delta\theta_f$  termometru wzrasta.

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. С.С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, В. М. Ванько, Т. Г. Бойко. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – С. 380.
2. Голембо В. А., Котляров В. Л., Швецкий Б. И. Пьезокварцевые аналого-цифровые преобразователи температуры / Львов : Вища школа, 1977. – С. 171 – 172.
3. Тумайкин Д. Прецизионный термометр для промышленного применения на основе термочувствительных кварцевых резонаторов // Компоненты и технологии. – 2008. – №1. – С. 15–16.
4. Заднепрятный И. Прецизионные кварцевые датчики производства российской компании "СКТБ ЭлПА // Компоненты и технологии. – 2005. – №6. – С.11–13.
5. <http://bourabai.kz/toe/device10.htm/>
6. [http://we.pb.edu.pl/~ketim/ketim-md/eitd\\_2\\_m/M-13.pdf](http://we.pb.edu.pl/~ketim/ketim-md/eitd_2_m/M-13.pdf)
7. [http://pl.wikipedia.org/wiki/Przerzutnik\\_typu\\_D](http://pl.wikipedia.org/wiki/Przerzutnik_typu_D)

## ANALYSIS OF ERROR OF MEASURING FREQUENCY OF QUARTZ THERMOMETER

The review of progress of the high-fidelity measuring trends showed that it is needed to search new ways to the improvement of metrology descriptions of thermometers. One of methods of minimization of absolute error of measuring temperature is reduction of error of measuring digital signal. Component errors are reduced, it is conducted their analysis and shown out dependence, that showed most effective method to promote measuring exactness - reduction of measurable frequency. It will be realized by introduction to the electric circle the special device - mixer. The device construction and his principle of action is described. Also as a result of analysis influence is reduced on exactness of measuring are another component – time of measuring. An algorithm at that it is not needed to increase measuring time is offered, but exactness will grow.

**Keywords:** quartz thermometer, frequency, sensitive, mixer.