

## BADANIE NIELINIOWOŚCI W PRECYZYJNYM POMIARZE PRZEDZIAŁU CZASU DLA WYBRANYCH TYPÓW CZĘSTOŚCIOMIERZY-CZASOMIERZY

Arkadiusz URBAN<sup>1</sup>, Albin CZUBLA<sup>1</sup>, Roman OSMYK<sup>1</sup>, Piotr SZTERK<sup>1</sup>,  
Przemysław KREHLIK<sup>2</sup>, Łukasz ŚLIWCZYŃSKI<sup>2</sup>

1. Główny Urząd Miar, Zakład Elektryczny, Laboratorium Czasu i Częstotliwości, ul. Elektoralna 2, 00-950 Warszawa  
tel.: 22 531 9418 e-mail: timegum@gum.gov.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Katedra Elektroniki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel.: 12 617 27 40 e-mail: krehlik@agh.edu.pl:

**Streszczenie:** Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie metody i wyników badań nad nieliniowością częstotliczomierzy-czasomierzy w pomiarach precyzyjnych przedziałów czasu, prowadzonych w GUM przy współpracy z AGH. Dokonano porównań wyników pomiarów dla częstotliczomierzy-czasomierzy SR620 i HP 53132A zarówno stałych i zmiennych przedziałów czasu. Potwierdzono przydatność dwukanałowego generatora/dzielnika typu Dual Channel 1/100 PPS Generator oraz komparatora częstotliwości typu A7-MX.

**Słowa kluczowe:** pomiar przedziału czasu, częstotliczomierz-czasomierz, nieliniowość, niepewność pomiaru.

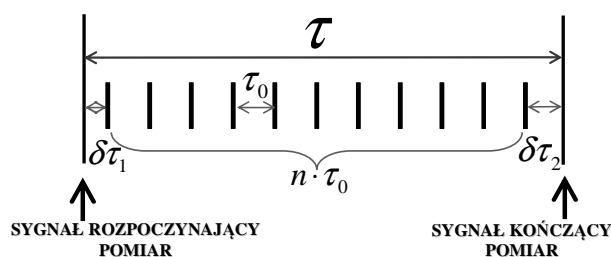
### 1. WPROWADZENIE

#### 1.1 Pomiar przedziału czasu

We współczesnych częstotliczomierzach-czasomierzach cyfrowych pomiar przedziału czasu pomiędzy sygnałem wyzwalającym i sygnałem zatrzymującym pomiar odbywa się zazwyczaj jedno- lub dwuetapowo (Rys. 1) [1-3]. Pierwszy (i dla niektórych przyrządów o mniejszej dokładności ostatni) etap polega na zliczaniu impulsów/okresów  $\tau_0$  wewnętrznego sygnału zegarowego w mierzonym przedziale czasu  $\tau$ , stąd w nazewnictwie angielskim stosowane są dla tej grupy przyrządów nazwy: *Time Interval Counter* lub *Universal Counter*. Drugi etap, stosowany w przyrządach o wymaganej większej dokładności, polega na dodatkowym pomiarze krótkich reszkowych przedziałów czasu  $\delta\tau_1$  i  $\delta\tau_2$  pomiędzy sygnałem otwierającym bramkę pomiarową (sygnałem wyzwalającym pomiar) a pierwszym następującym po nim impulsem wewnętrznego sygnału zegarowego oraz pomiędzy ostatnim impulsem wewnętrznego sygnału zegarowego w mierzonym przedziale czasu a sygnałem zamykającym bramkę pomiarową (sygnałem zatrzymującym pomiar). Wówczas wartość mierzonego przedziału czasu jest wyliczana z prostej formuły:

$$\tau \approx n \cdot \tau_0 + \delta\tau_1 + \delta\tau_2, \quad (1)$$

gdzie:  $\tau$  - mierzony przedział czasu,  $n$  - liczba zliczonych okresów  $\tau_0$  wewnętrznego sygnału zegarowego,  $\delta\tau_1$  i  $\delta\tau_2$  - mierzone reszkowe przedziały czasu.



Rys. 1. Ilustracja zasady pomiaru przedziału czasu w współczesnych częstotliczomierzach-czasomierzach (oznaczenia jak we wzorze (1) i w tekście)

Przy wysokiej jakości mierzonych sygnałów (np. branych z zegarów atomowych), o rzeczywistej dokładności pomiaru przedziału czasu decyduje głównie jakość pomiaru reszkowych przedziałów czasu  $\delta\tau_1$  i  $\delta\tau_2$ , co z kolei jest konsekwencją jakości działania przetworników przedziału czasu na amplitudę [1], działania linii opóźniających czy też zastosowania bardziej złożonych wewnętrznych algorytmów i interpolatorów [2, 3].

#### 1.2 Nieliniowości w pomiarze przedziału czasu

Pomiędzy obserwowanymi na częstotliczomierzu-czasomierzu wskazaniem  $\tau_w$  a rzeczywistymi wartościami mierzonego przedziału czasu  $\tau$  powinna zachodzić zależność liniowa. Odstępstwa od, z założenia, liniowej charakterystyki przetwarzania wewnętrznych układów pomiarowych, algorytmów i interpolatorów przy pomiarze przedziału czasu są traktowane, w rozumieniu niniejszego artykułu, jako nieliniowości. Sytuację tę odzwierciedla niezerowy zmienny człon  $x(\tau, t, \dots)$  we wzorze (2):

$$\tau_w - \tau = \text{const} + x(\tau, t, \dots), \quad (2)$$

gdzie:  $\tau$  - mierzony przedział czasu,  $\tau_w$  - bieżące wskazanie częstotliczomierza-czasomierza,  $x(\tau, t, \dots)$  - zmienna składowa odchylenia bieżącego wskazania częstotliczomierza-czasomierza od wartości mierzonego przedziału czasu,  $t$  - moment wykonania pomiaru.

Za miarę ww. nieliniowości przyjęto obserwowany zakres (peak-to-peak) odchylenia wartości  $\tau_w$  od wartości mierzonego przedziału czasu  $\tau$ , gdzie odchylenie to może być zarówno zależne od wartości mierzonego przedziału czasu, jak i zmienne w czasie, czy zależne od wewnętrznych relacji pomiędzy sygnałami zachodzącymi w częstotliwościomierz-czasomierzu, a także od zewnętrznych warunków środowiskowych.

Wiedza ilościowa na temat tego rodzaju nieliniowości ma duże znaczenie przy ocenie niepewności wyniku pomiaru przy kalibracji i użytkowaniu systemów do precyzyjnego transferu czasu [4, 5], wzorcowaniu wysokostabilnych wzorców częstotliwości, gdzie odchylenia względne od wartości nominalnej częstotliwości wyznacza się poprzez pomiar przyrostu fazy sygnału względem sygnału odniesienia, czy prowadzeniu prac badawczo-rozwojowych w tym zakresie.

## 2. METODA POMIAROWA

### 2.1 Analiza problemu

Pomiar stałego przedziału czasu, np. opóźnienia sygnału wnoszonego przez kabel o stałej długości, może być źródłem informacji o nieliniowościach zachodzących w pomiarze przedziału czasu, jeśli wewnętrzne relacje pomiędzy sygnałami w częstotliwościomierz-czasomierzu ulegają zmianie (przykładowo mierzone resztkowe przedziały czasu  $\delta\tau_1$  i  $\delta\tau_2$ ) lub zmianom ulegają parametry pracy układów wewnętrznych. Wówczas obserwowane zmiany wskazania częstotliwościomierza-czasomierza mogą przekraczać wielokrotnie krótkoterminowy szum pomiaru. Przykładowe wyniki takiego pomiaru przedstawione są na rysunku 3. Pozwala to ocenić stabilność wskazań i potencjalny wpływ na wynik pomiaru warunków środowiskowych.

Typowo do weryfikacji istnienia ww. nieliniowości, wartość mierzonych kontrolnie przedziałów czasu zmieniana jest zwykle skokowo (np. o 100 ps, 1 ns) [1]. Oczekuje się wówczas odpowiednio skokowej zmiany obserwowanego wskazania o taką samą wartość, ale to nie daje pewności, czy przy płynnej (ciągłej) zmianie wartości mierzonego przedziału czasu, obserwowane odchylenia nie byłyby większe.

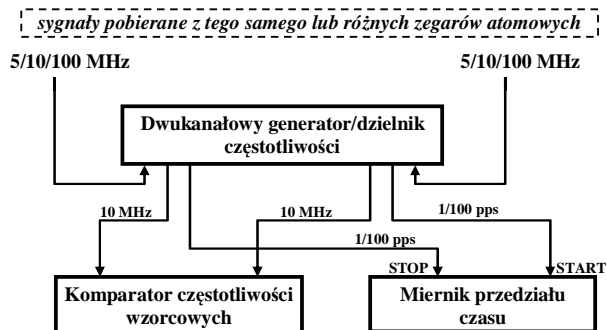
W związku z tym, w ramach wspólnych zadań i prac badawczo-rozwojowych GUM i AGH opracowano układ pomiarowy, który umożliwia badanie nieliniowości w pomiarze przedziału czasu, przy zachowaniu warunku płynnej zmiany wartości mierzonego przedziału czasu.

### 2.2 Zaproponowany układ pomiarowy

Schemat blokowy układu pomiarowego do badania nieliniowości w pomiarze przedziału czasu przedstawiony został na rysunku 2.

Zasadniczym elementem zaproponowanego układu pomiarowego jest opracowany przez AGH dwukanałowy generator/dzielnik częstotliwości, tzw. Dual channel 1/100 pps generator, oraz precyzyjny komparator częstotliwości wzorcowych, w naszym układzie pomiarowym typu A7-MX. Dual channel 1/100 pps generator przekształca podawane niezależnie na dwa kanały sygnały wejściowe, wymiennie o częstotliwości 5 MHz, 10 MHz lub 100 MHz, w dwie pary sygnałów wyjściowych: jeden sygnał sinusoidalny o częstotliwości 10 MHz i jeden sygnał impulsowy 1 pps lub 100 pps (pps = *ang. pulse per second* – jeden impuls na sekundę) w każdej parze.

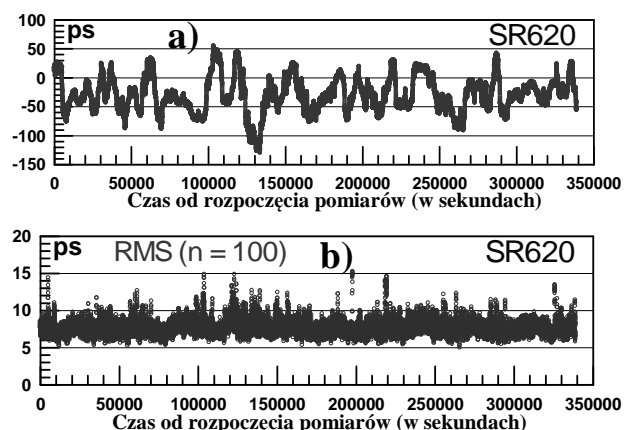
Konstrukcja tego urządzenia zapewnia utrzymywanie stałego przesunięcia fazy pomiędzy wyjściowym sygnałem częstotliwości 10 MHz a sygnałem impulsowym 1/100 pps w każdej parze, a także gwarantuje wysoką jakość sygnałów impulsowych (o prawie jednakowym kształcie przebiegu, amplitudzie i czasie narastania ok. 400 ps), co ma istotny wpływ na stabilność i powtarzalność mierzonego przedziału czasu pomiędzy sygnałami impulsowymi.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego do badania charakterystyki nieliniowości częstotliwościomierza-czasomierza

Komparator częstotliwości wzorcowych, poprzez zastosowanie wielokrotne mieszanie porównywanych częstotliwości z sygnałami pomocniczymi, zwielokrotnia względną różnicę częstotliwości wejściowych nawet do  $10^5$  razy, co pozwala rejestrować zmiany fazy (czas fazowy wyrażony w jednostkach czasu) pomiędzy sygnałami wejściowymi na poziomie pojedynczych femtosekund [6].

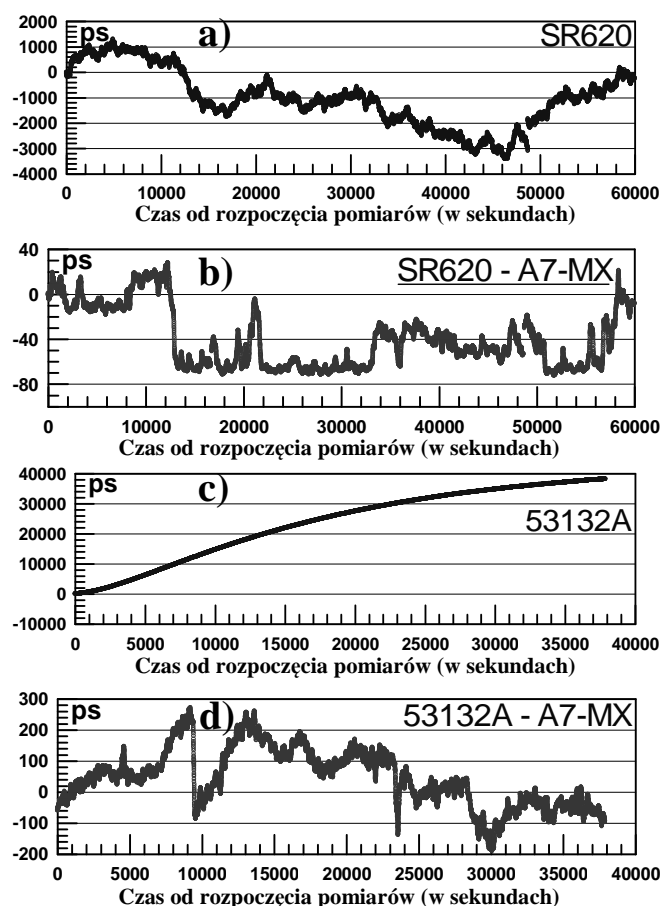
Wykonując jednocześnie, za pomocą komparatora częstotliwości wzorcowych, pomiary zmian fazy pomiędzy sygnałami częstotliwości 10 MHz oraz, za pomocą badanego częstotliwościomierza-czasomierza, pomiary przedziału czasu pomiędzy sygnałami 1 pps lub 100 pps, można porównać ze sobą obserwowane wyniki pomiarów. Faza pomiędzy sygnałami wejściowymi może ulegać zmianom i wówczas odpowiada to pomiarowi płynnie zmieniającego się przedziału czasu. Jeżeli na obydwu wejścia generatora/dzielnika częstotliwości podany zostanie ten sam sygnał, wtedy faza pomiędzy mierzonymi sygnałami jest w przybliżeniu stała i mierzony jest stały przedział czasu. Pomiary wykonywane za pomocą komparatora częstotliwości wzorcowych stanowią wówczas dodatkowe potwierdzenie, że wartość mierzonego przedziału czasu faktycznie nie ulega zmianom.



Rys. 3. Przykładowe wyniki pomiarów uzyskane przy pomiarze stałego przedziału czasu: a) zmiany wskazania częstotliwościomierza-czasomierza typu SR620, b) odchylenie standardowe (RMS) wyliczone z serii po 100 pomiarów

W przypadku stosowania niezależnych programów komputerowych do rejestracji danych pomiarowych z komparatora częstotliwości wzorcowych i badanego częstościomierza-czasomierza, tak jak w naszym przypadku, ważne jest zapewnienie jednoczesności i równomierności rejestracji danych pomiarowych. Porównanie zmian wskazań komparatora i częstościomierza-czasomierza ma sens, jeśli dotyczą w przybliżeniu tej samej chwili.

Przedmiotem dalszej analizy są częstościomierze-czasomierze typu SR620 i 53132A. Sygnały wzorcowe pobierane są z atomowych cezowych wzorców czasu i częstotliwości typu 5071A lub z masera wodorowego typu 1005 VCH.



Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiarów uzyskane dla zmiennego przedziału czasu: a) i c) zmiany wartości mierzonego przedziału czasu (odpowiednio dla SR620 i 53132A), b) i d) zmiany różnic wskazań pomiędzy SR620 (lub 53132A) a A7-MX

### 3. WYNIKI POMIARÓW

Przykładowe wyniki pomiarów dla stałego i zmiennego przedziału czasu przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Wyniki pomiarów były rejestrowane automatycznie co 1 s przez niezależne programy obsługujące oba urządzenia w systemie pomiarowym, a następnie zostały poddane analizie w arkuszu kalkulacyjnym Excel.

Pomimo obserwowanego stosunkowo niewielkiego szumu pomiarów, za którego miarę tu przyjęto odchylenie standardowe eksperymentalne z serii 100 pomiarów (ok. 10 ps dla SR620 i ok. 100 ps dla 53132A), wskazania obu częstościomierzy-czasomierzy podlegały wielokrotnie większym wahaniom względem wartości mierzonego

przedziału czasu. Zakres (peak-to-peak) zaobserwowanych dodatkowych wahań wskazania względem wartości mierzonego przedziału czasu wynosił dla SR620 maksymalnie ok. 190 s, natomiast dla 53132A – ok. 450 ps.

W obu przyrządach stwierdzono istnienie zarówno ciągłych („płynnych”), jak i skokowych zmian wskazania, zależnych prawdopodobnie od wielu czynników losowych. Okresowo widoczne były zmiany odchylenia wskazania od wartości mierzonego przedziału czasu, które można było uznać za skorelowane ze zmianami mierzonego przedziału czasu, ale o zmiennych w czasie współczynnikach. Zauważono również nieznaczny wpływ wahań temperatury na parametry pracy układów przetwarzających mierzone sygnały.

### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zaprezentowana metoda pozwala z dużą precyzją zweryfikować istnienie i oszacować ilościowo nieliniowości zachodzące w pomiarze przedziału czasu za pomocą częstościomierza-czasomierza. Niestety praca wewnętrznych układów pomiarowych w częstościomierzu-czasomierzu zależna jest od zbyt wielu czynników o charakterze losowym i nie udaje się uzyskać powtarzalnych zależności, choć charakter i zakres obserwowanych zmian pozostaje w przybliżeniu niezmienny. Na podstawie uzyskanych wyników można jednak ocenić czy warto zastosować dany przyrząd w precyzyjnych pomiarach przedziału czasu, jaką mu przypisać niepewność pomiaru, czy jest czynnikiem dominującym i ograniczającym dokładność pomiaru.

Przedmiotem dalszych badań będą pomiary przedziałów czasu pomiędzy sygnałami 100 pps oraz pomiary z układem do automatycznej zamiany kolejności mierzonych sygnałów w parach. Prawdopodobnie pozwoli to uzyskać odpowiedź na pytanie, czy wspomniane wyżej czynniki losowe ulegną uśrednieniu przy 100-krotnym zwiększeniu częstotliwości pomiaru przedziału czasu i czy obserwowane fluktuacje odchylenia wskazań częstościomierzy-czasomierzy względem wartości mierzonego przedziału czasu zmieniają się jednakowo w całym zakresie pomiarowym przyrządu.

### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Model SR620 Universal Time Interval Counter, Stanford Research Systems, 1989, rev. 2.5 (4/2004).
2. Kalisz J.: Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution, Metrologia 41 (2004), s 35–51.
3. Szplet R., Jachna Z., Kwiatkowski P., Różyc K.: A 2.9 ps equivalent resolution interpolating time counter based on multiple independent coding lines, Meas. Sci. Technology 24 (2013), 035904.
4. Śliwczyński Ł., Krehlik P., Czubla A., Buczek Ł., Lipiński M.: Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km, Metrologia 50 (2013), s. 133-145.
5. Lewandowski W., Matsakis D., Panfilo G., Tavella P.: The evaluation of uncertainty in  $[UTC-UTC(k)]$ , Metrologia 43 (2006), s. 278-286.
6. A7-MX. Frequency, Phase & Phase Noise Measurement System. Operation Manual, Quartzlock, 23 June 2008.

## VERIFICATION OF NONLINEARITIES IN TIME INTERVAL MEASUREMENT WITH A CHOSEN TYPE OF TIME INTERVAL COUNTERS

In this paper we present the method and the last results of verification of nonlinearities in time interval measurements with the usage of Time Interval Counters (TIC), performed at Central Office of Measures (GUM) with cooperation of AGH University of Science and Technology. We consider the non-ideal operation of TIC manifested by fluctuations of differences between the current indication of TIC and the real value of the measured time interval. We observed instabilities of indications of TIC, even if the measured time interval is keeping constant. For verification of TIC operation at continuously changed time intervals, it was set up a special measurement system that performs simultaneous measurements of the phase-time changes between two standard frequency signals (with the usage of A7-MX standard frequency comparator) and time intervals between two pulse signals (with the usage of TIC under test). Due to applying a special, developed by AGH, dual channel 1/100 pps generator, the measured 1 pps (1 pulse per second) and 10 MHz signals are standardized and the phase-time between 1 pps and 10 MHz signals are kept in pairs constant. Differences between the indications of TIC and the proper measurement results for frequency allow to verify internal nonlinearities of TIC in time interval measurements.

Here, we show and shortly discuss the results obtained for SR620 and 53132A universal counters. The obtained range of fluctuations of indications of SR6200 with relation to the measured time interval approaches about 190 ps, and for 53132A – about 450 ps, whereas the observed short-term noise of measurement for SR620 is about 10 ps, and for 53132A – about 100 ps typically. It was confirmed the complex and random influence of many factors on operation of TIC.

Our investigation will be continued with the usage of 100 pps (100 pulses per second) signals and with automatic switching of the measured pulse signals in pairs.

**Keywords:** time interval measurement, time interval counter, nonlinearity, measurement uncertainty.