

*Albin CZUBLA, Piotr SZTERK, Roman OSMYK*  
*Główny Urząd Miar*  
*Samodzielne Laboratorium Czasu i Częstotliwości*

## **PUŁAPKI W PRECYZYJNYCH POMIARACH PRZEDZIAŁU CZASU**

W precyzyjnych pomiarach przedziału czasu, przy ocenie ich wewnętrznej spójności, czy też ocenie wyników kalibracji systemów do transferu czasu lub wyników porównań międzylaboratoryjnych, których przedmiotem są precyzyjne pomiaru przedziału czasu, często pojawiają się nieoczekiwane rozbieżności w wynikach, powodując początkowo konsternację nawet u doświadczonych metrologów. Tego rodzaju napotkane problemy i ich wyjaśnienia będą przedmiotem niniejszego referatu.

**Słowa kluczowe:** pomiar przedziału czasu, pomiar opóźnienia, miernik przedziału czasu, dokładność

### **TRAPS IN THE PRECISE TIME INTERVAL MEASUREMENTS**

In the precise time interval measurements, when their internal consistency or the results of interlaboratory comparisons in a precise time interval measurement domain or the results of the precise calibration of time transfer systems are analyzed in details, unexpected discrepancies in the results often occur, initially causing consternation even in more experienced metrologists. Problems of this kind and their explanations are the subject of this paper.

**Keywords:** time interval measurement, delay measurement, time interval counter, accuracy

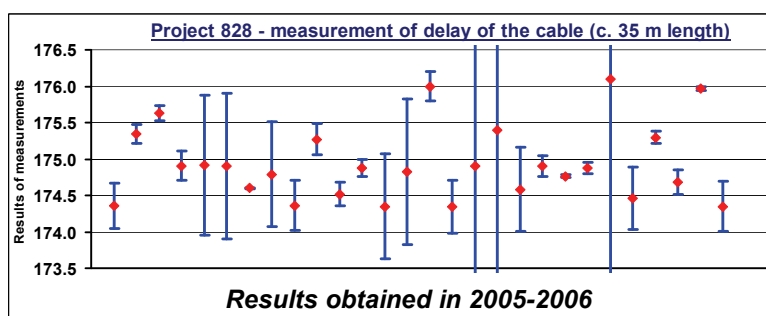
## **1. WPROWADZENIE**

W dziedzinie pomiarów przedziału czasu, wielu nawet zaawansowanych użytkowników przyjmuje nazbyt optymistycznie założenie, że wykonanie przyrządu pomiarowego oraz jego fabryczna kalibracja zapewniają same w sobie minimalizację błędów i składowych systematycznych wyniku pomiaru, zwłaszcza gdy mierzony przedział czasu jest na tyle krótki, że można pominąć składową błędów związaną z odstrojeniem i niestabilnością podstawy czasu. Jeśli jednak precyzja i dokładność wyniku pomiaru przedziału czasu ma istotne znaczenie dla oceny wyników eksperymentu naukowego, jak było w CERN w przypadku pomiaru prędkości neutronów [1], kalibracji systemów do transferu czasu, oceny wyników porównań międzylaboratoryjnych, szacowania zdolności pomiarowych, oceny faktycznej dokładności metody pomiarowej, dokładności synchronizacji zegarów, itp., wówczas mogą pojawić się rozbieżności w wynikach, znacznie przekraczające przypisane rozszerzone niepewności do wyników pomiaru. Powodem tego stanu rzeczy jest m.in. faktyczna złożoność precyzyjnych pomiarów przedziału czasu, różnorodność możliwych do zastosowania konfiguracji pomiarowych, konieczność doprowadzenia sygnałów do miejsca realizacji pomiaru, ograniczona znajomość asymetrii opóźnień (czasowych) mierzonych sygnałów względem pierwotnych miejsc i momentów ich wystąpienia, czy też niejednakowe przetwarzanie mierzonych sygnałów podawanych na wewnętrzne układy pomiarowe zastosowanego miernika przedziału czasu (TIC – ang. Time Interval Counter). Tego rodzaju „pułapek” jest wiele i najczęściej zdajemy sobie z nich sprawę dopiero wtedy, gdy sami w nie wpadniemy.

## **2. POMIAR OPÓŹNIENIA KABLI – PROJEKT EUROMET-U NR 828**

Projekt EUROMET-u nr 828: „Porównanie pomiarów przedziału czasu (opóźnień kabli)” [2] jest bardzo dobrym przykładem jednej z takich pułapek. Projekt ten został zrealizowany w latach 2004-2007 i miał na celu stać się porównaniem uzupełniającym do porównań kluczowych w dziedzinie

czasu i częstotliwości. W projekcie, jako uczestnicy porównań wzięły udział praktycznie wszystkie europejskie Krajowe Instytuty Metrologiczne (NMI – ang. National Metrology Institute) i Jednostki Desygnowane (DI – ang. Designated Institutes) posiadające zegary atomowe, systemy do ich porównań i regularnie przesyłające dane z tych systemów do Międzynarodowego Biura Miar (BIPM – fr. Bureau Internationale Poids et Mesures), czyli zajmujące się pomiarami czasu i częstotliwości na najwyższym poziomie w danym kraju. Jako obiekt porównań wybrano trzy kable koncentryczne, odpowiednio umocowane wewnątrz zamkniętej obudowy, z wyprowadzonymi na zewnątrz tylko gniazdami BNC, a jako wielkość mierzoną przyjęto wartości opóźnień tych kabli. Laboratorium pilotujące porównanie, które przygotowało obiekt porównania, przeprowadziło niezbędne pomiary potwierdzające wymaganą stabilność, powtarzalność i odtwarzalność, uzyskując za każdym razem wyniki zgodne z poprzednimi. Natomiast wyniki pomiarów uzyskane przez poszczególnych uczestników różniły się maksymalnie do ok. 1 % wartości wielkości mierzonej, tzn. dla mierzonego opóźnienia o wartości ok. 175 ns maksymalna różnica między wynikami sięgała 1,75 ns, przy znacznie mniejszych niepewnościach rozszerzonych (Rys. 1). Każdy z uczestników do pomiaru opóźnienia używał swojego sygnału o innym nachyleniu. Ze względu na silną zależność tłumienia sygnału w kablu koncentrycznym od częstotliwości (wyższe składowe częstotliwości sygnału są silniej tłumione, skutkiem czego kabel koncentryczny działa dla sygnału impulsowego lub prostokątnego jak filtr dolnoprzepustowy), prowadziło to do różnych zmiany nachylenia sygnałów na wyjściu mierzonych kabli w stosunku do nachylenia sygnału na wejściu, a w konsekwencji do pomiaru innych wartości opóźnień. Zatem każdy z uczestników projektu mierzył nieco inną wartość opóźnienia, tzn. dla innego rodzaju sygnału, stąd wyniki nie mogły być porównywalne.

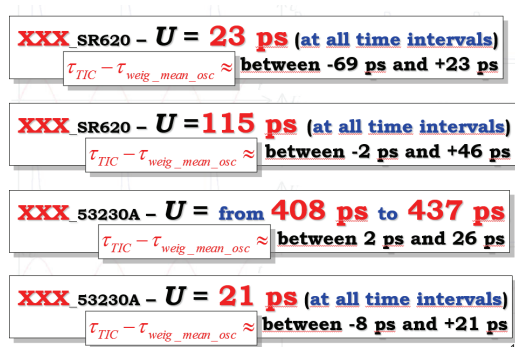


Rys. 1. Przykładowe wyniki pomiarów opóźnień kabli uzyskane w ramach projektu EUROMETu Nr 828. Obserwowana rozbieżność między wynikami (sięgająca do 1,75 ns) jest skutkiem użycia w pomiarach opóźnień sygnałów o różnych nachyleniach

### 3. POMIARY PRZEDZIAŁU CZASU POMIĘDZY SYGNAŁAMI O JEDNAKOWYM NACHYLENIU – PROJEKT EURAMET-U NR 1288

W ramach kolejnego projektu EURAMET-u nr 1288, realizowanego w latach 2013-2018, opracowano już obiekty porównań, które generowały sygnały przez własne, odpowiednio dopasowane układy wyjściowe, zapewniające w przybliżeniu jednakowe charakterystyki sygnałów wyjściowych, w tym nachylenie i krótki czas narastania ( $< 1$  ns) mierzonych sygnałów, minimalizując błędy wyzwalania i szum pomiaru. Tym razem najpierw przeprowadzono niewielkie (pomiędzy kilkoma uczestnikami projektu) pilotażowe porównanie pomiaru generowanych przedziałów czasu za pomocą szybkich oscyloskopów cyfrowych, z możliwością dodatkowego wykonania pomiarów za pomocą mierników przedziałów czasu [3]. Uzyskano zgodne między sobą wszystkie wyniki pomiarów oscyloskopowych, z niepewnością rozszerzoną średniej ważonej nie przekraczającej 3 ps, natomiast nieoczekiwanie niektóre wyniki pomiarów tych samych przedziałów czasu mierzonych miernikami

przedziałów czasu różniły się od średniej ważonej z pomiarów oscyloskopowych o wartość przekraczającą wartość przypisaną niepewności rozszerzonej do wyniku pomiaru (Rys. 2).



Rys. 2. Podsumowanie wyników pomiarów przedziałów czasu wykonanych za pomocą mierników przedziału czasu (TIC) w 2016 r. podczas pilotażowego porównania EURAMET-u (project nr 1288), towarzyszących właściwym pomiarom oscyloskopowym wzorcowych przedziałów czasu z generatora TIGen o pikosekundowej dokładności. W niektórych przypadkach różnice między wynikami pomiarów TIC i pomiarów oscyloskopowych przekraczają rozszerzone niepewności (U) pomiarów TIC

Tym razem były dwa powody takiej sytuacji. Po pierwsze, pomimo że realizowane miernikami przedziału czasu pomiary były wykonane technicznie poprawnie, tzn. z redukcją różnicy opóźnień kabli doprowadzających sygnały na wejścia pomiarowe (z zamianą sygnałów miejscami i dodatkowym pomiarem dopełnienia sygnału do pełnego okresu lub z dwoma oddzielnymi pomiarami każdego sygnału z osobną względem pomocniczego sygnału odniesienia), to w niepewności wyniku pomiaru w niektórych przypadkach nie uwzględniono występujących wewnętrznych nieliniowości w pomiarze przedziału czasu – mających lokalnie i chwilowo charakter systematyczny, ale o zmiennej wartości przy zmianie wartości mierzonego przedziału czasu [4]. A po drugie, w niektórych przypadkach przy zamianie kabli miejscami doprowadzających sygnały na wejścia pomiarowe miernika przedziału czasu, jednocześnie dokonano programowej zamiany kolejności wejść pomiarowych, co prowadzi do niepełnej redukcji różnicy wewnętrznych opóźnień wejść pomiarowych i powinno być uwzględnione w szacowaniu niepewności wyniku pomiaru.

#### 4. POMIARY PRZEDZIAŁU CZASU POMIĘDZY SYGNAŁAMI O RÓŻNYM NACHYLENIU – POMIARY KALIBRACYJNE SYSTEMÓW DO TRANSFERU CZASU

Na kolejny problem napotyka się przy precyzyjnych pomiarach przedziału czasu pomiędzy sygnałami o różnym nachyleniu. Nawet jeśli tego rodzaju pomiary są wykonywane w pełni poprawnie technicznie, tj. w odpowiedniej sekwencji, z redukcją różnicy opóźnień kabli doprowadzających sygnały i wewnętrznej różnicy opóźnień w kanałach pomiarowych, przy tych samych poziomach wyzwalania, itp., ale różnymi miernikami przedziału czasu, wówczas wyniki tego rodzaju pomiarów mogą się różnić między sobą nawet o ok. 1 ns, co znacznie przekracza coraz częściej oczekiwaną na poziomie 100 ps niepewność kalibracji poszczególnych elementów systemów do transferu czasu.

Wyjaśnienia powyższego efektu należy szukać w odmienności parametrach układów wejściowych, które, w zależności od szerokości pasma przenoszenia częstotliwości, czy też dopasowania impedancji, nierównomiernie pochylają zbrocza sygnałów wejściowych, równocześnie zmieniając wartość mierzonego przedziału czasu. Można przyjąć, że pomiar wykonany za pomocą oscyloskopu o wysokim paśmie przenoszenia byłby najbliższy właściwemu wynikowi pomiaru, natomiast pomiar wykonany za pomocą miernika przedziałów czasu o starszej konstrukcji byłby mniej dokładny.

## 5. PODSUMOWANIE

Z wielu wskazanych powyżej problemów i pułapek w precyzyjnych pomiarach przedziałów czasu można nie zdawać sobie sprawy, dopóki nie porównamy wyników pomiarów ze sobą. Obecnie w dziedzinie światłowodowego, czy też satelitarnego transferu czasu i częstotliwości, schodzi się na poziom pikosekundowy, gdzie tego rodzaju efekty są już wyraźnie widoczne, ale ciągle budzą zaskoczenie. Autorzy w powyższej analizie zwrócili uwagę na wprawdzie znane od wielu lat zjawiska, o których istnieniu wielu metrologów zdaje się jednak zapomnieć, a które obecnie zaczynają mieć kluczowe znaczenie w podnoszeniu dokładności pomiarów przedziałów czasu. Ważne jest, aby osiągając coraz większy poziom precyzji, nie zapomnieć o zapewnieniu wiarygodności i porównywalności wyników pomiaru.

## LITERATURA

- 1 G. Brumfiel, “Neutrinos not faster than light”, Nature News, 2012, doi:10.1038/nature.2012.10249
- 2 A. Niessner, W. Mache, “Final report. Project No 828. EUROMET TF.TI-K1 Comparison of time interval (cable delay) measurement”, BEV, 2007
- 3 A. Czubla, P. Szterk, P. Krehlik, Ł. Śliwczyński, M. Yogun, R. Hamid, K. AlDawood, F. Almuhlaki, A. Aljawan, I. Alboraih, B. Pinter, M. Marszalec, M. Lusawa, “Pilot Comparison of Time Interval Measurements with High Speed Oscilloscopes – initial results”, presented during EFTF 2016, unpublished.
- 4 A. Czubla, R. Osmyk, P. Szterk, P. Krehlik, Ł. Śliwczyński, R. Szplet, Z. Jachna, K. Różyc, „Verification of TIC Characteristics for Precise Optical Fiber Time Transfer Links”, in Proc. of European Frequency and Time Forum (EFTF), 2014, IEEE, doi: 10.1109/EFTF.2014.7331507