

Albin CZUBLA, Jan STĘPNIEWSKI, Janusz KONOPKA

GŁÓWNY URZĄD MIAR, ZAKŁAD METROLOGII ELEKTRYCZNEJ, LABORATORIUM CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI

Pomiar różnicy faz sygnałów napięciowych**Dr Albin CZUBLA**

Kierownik Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Od 2002 r. zajmuje się metrologią czasu i częstotliwości w zakresie prowadzenia atomowych skal czasu, analizy stabilności sygnałów czasu i częstotliwości, precyzyjnego transferu czasu, szacowania niepewności pomiaru, rozwijania metod pomiarowych. Autor lub współtwórca wielu instrukcji wzorcowania i publikacji.



e-mail: timegum@gum.gov.pl

Mgr inż. Jan STĘPNIEWSKI

Główny metrolog w Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Od 2000 r. zajmuje się metrologią czasu i częstotliwości w zakresie analizy metod pomiarowych, praktycznych aspektów szacowania niepewności pomiaru i wykonywania wzorcowań przyrządów z tej dziedziny. Autor lub współautor wielu instrukcji wzorcowania. Prowadzi szkolenia i konsultacje z zakresu wykonywania wzorcowań ze swojej dziedziny.



e-mail: timegum@gum.gov.pl

Mgr inż. Janusz KONOPKA

Główny metrolog w Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Opiekun Państwowego Wzorca Jednostek Miar Czasu i Częstotliwości i autor jego dokumentacji. Od ponad 30 lat zajmuje się metrologią czasu i częstotliwości w zakresie prowadzenia atomowych wzorców czasu i częstotliwości, skal czasu i analizy ich stabilności, precyzyjnego transferu czasu. Autor licznych konstrukcji elektronicznych.



e-mail: timegum@gum.gov.pl

Streszczenie

W niniejszym referacie przedstawiona została teoria i praktyka pomiaru różnicy faz sygnałów napięciowych za pomocą częstotlicznika-czasomierza cyfrowego. Szczególną uwagę zwrócono na czynniki mające bezpośredni wpływ na wartość i niepewność wyniku pomiaru oraz zaproponowano sposób zminimalizowania ich wpływu. W efekcie uzyskano zweryfikowane i spójne wyniki pomiaru różnicy faz sygnałów napięciowych wykonanych za pomocą częstotlicznika-czasomierza, w pełni wykorzystując dużą precyzję pomiaru czasu.

Słowa kluczowe: precyzyjny pomiar fazy, metrologia czasu i częstotliwości.

Phase measurements of voltage signals**Abstract**

In this paper, we present the theory and practical aspects of phase measurements of voltage signals with usage of universal time and frequency counter. Special attention is turned to the factors which influence directly the final value and uncertainty of measurement's result. We propose a method of reducing their influence. As a result, we obtain verified and consistent results of phase measurements of voltage signals performed with a universal time and frequency counter, using to the full its high precision for time measurements.

Keywords: precise phase measurement, time and frequency metrology.

1. Wprowadzenie

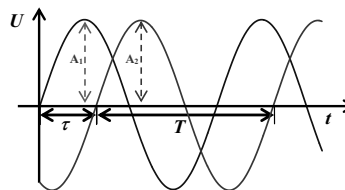
Pomiar różnicy faz sygnałów napięciowych lub, w stosowanym wymiennie sformułowaniu, pomiar fazy sygnału mierzonego względem sygnału odniesienia można zrealizować jako pomiar w dziedzinie czasu i częstotliwości. Tę funkcję pomiaru posiada praktycznie każdy nowoczesny wielofunkcyjny częstotlicznik-czasomierz cyfrowy, gdzie pomiar różnicy faz sprowadzony jest do bezpośredniego następujących po sobie: pomiaru okresu sygnału odniesienia oraz pomiaru przedziału czasu pomiędzy zboczami tych sygnałów o jednakowym kierunku nachylenia [1, 2]. W przypadku typowych przyrządów skonstruowanych wyłącznie do pomiaru fazy, tzw. fazomierzy, pomiar fazy polega na formowaniu sygnału prostokątnego o znormalizowanej amplitudzie i okresie równym okresowi sygnału odniesienia oraz o współczynniku wypełnienia odpowiadającym fazie mierzonego sygnału [3].

Pomiędzy tymi dwoma metodami występują zdecydowane różnice. W pierwszym przypadku wykorzystuje się bardzo dobre możliwości częstotlicznika-czasomierzy cyfrowych do precyzyjnego pomiaru okresu i przedziału czasu, ale wadą jest zwykle niejednakowość poziomów wyzwalania, negatywne efekty związane z histerezą przy porównywaniu fazy sygnałów o różnych amplitudach oraz ograniczony zakres wartości napięć wejściowych. Z kolei w drugim przypadku konstrukcja fazomierzy jest specjalnie dostosowana do pomiaru sygnałów również o znacznie różniących się amplitudach i w szerokim zakresie napięć wejściowych, ale duży wpływ na wynik pomiaru fazy ma sposób adjustacji wstępnej przed pomiarami oraz stabilność napięć zasilających i dokładność komparatorów napięcia, a także charakterystyki wzmacniaczy i tłumików wejściowych, przez co pomiar jest zwykle mniej dokładny.

Dzięki wielofunkcyjności częstotlicznika-czasomierzy cyfrowych i ew. zastosowaniu układów pomocniczych, w przypadku pierwszej metody można ograniczyć negatywny wpływ na pomiar fazy wielu z występujących tu czynników i tym zagadnieniem poświęcona jest dalsza część niniejszego artykułu.

2. Pomiar w idealnych warunkach

Przy założeniu optymalnych warunków pomiarowych porównywane są sygnały sinusoidalne o ustalonej różnicy faz, jednakowych amplitudach i jednakowym poziomie zera, przewody doprowadzające sygnały na wejście pomiarowe (wejście A) i na wejście odniesienia (wejście B) przyrządu pomiarowego są jednakowego typu i w przybliżeniu równej długości oraz nastawione i rzeczywiste poziomy wyzwalania na przyrządzie pomiarowym są równe 0 V. Sytuacja taka jest przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Zakładana teoretycznie optymalna sytuacja pomiarowa. (T – okres sygnału odniesienia; τ – przedział czasu, o który sygnał mierzony wyprzedza sygnał odniesienia; A_1 , A_2 – amplitudy sygnałów)

Fig. 1. Optimal measurement condition assumed theoretically. (T – period of the reference signal; τ – time interval, about which the measured signal is before the reference signal; A_1 , A_2 – amplitudes of signals)

Przy powyższych założeniach różnica faz pomiędzy sygnałem mierzonym a sygnałem odniesienia wyrażona w stopniach jest równa:

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \cdot 360^\circ. \quad (1)$$

Wartości okresu T i przedziału czasu τ uzyskiwane są w wyniku realizowanych automatycznie pomiarów pośrednich, a na interfejsie

się wyjściowym częstotściomierza-czasomierza pojawia się już przeliczony na różnicę faz wynik pomiaru.

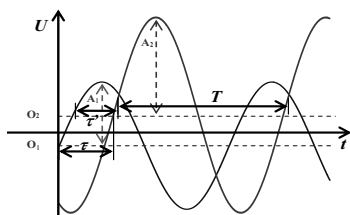
Przy zamianie sygnałów miejscami, w wyniku pomiaru uzyskuje się dopełnienie fazy do 360° , zgodnie ze wzorem:

$$\varphi' = \frac{T - \tau}{T} \cdot 360^\circ. \quad (2)$$

Ze względu na zakładaną równość amplitud sygnałów, istnienie histerezy wyzwalania nie zakłóca pośredniego pomiaru przedziału czasu τ .

3. Rzeczywiste warunki pomiaru

W rzeczywistych warunkach pomiarowych porównywane sygnały zazwyczaj mają różne amplitudy i przesunięcie względem siebie poziomu zera (niezerowe i różne składowe stałoprądowe), a poziomy wyzwalania w przyrządzie pomiarowym, pomimo jednakowych nastaw, są przesunięte względem siebie i różne od zera. Tego typu sytuacja jest przedstawiona przesadnie na rys. 2.



Rys. 2. Rzeczywista sytuacja pomiarowa (O_1, O_2 – poziomy składowych stałoprądowych sygnałów; τ' – faktycznie mierzony przedział czasu; pozostałe oznaczenia – jak na rys. 1)

Fig. 2. Real measurement condition (O_1, O_2 – DC levels of signals; τ' – real measured time interval; the remaining notations – as in fig. 1)

W tym przypadku w równaniu pomiaru fazy pojawia się szereg poprawek:

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \cdot 360^\circ = \frac{\tau'}{T} \cdot 360^\circ - \delta_1 + \delta_2 + \delta_A - \delta_B, \quad (3)$$

gdzie: δ_1 i δ_2 – poprawki związane z niezerowymi poziomami O_1 i O_2 składowych stałoprądowych sygnałów, δ_A i δ_B – poprawki związane z niezerowymi poziomami wyzwalania pomiaru na wejściach odpowiednio A i B przyrządu pomiarowego.

Wartości poprawek: $\delta_1, \delta_2, \delta_A$ i δ_B są wprost proporcjonalne do odpowiednich związanych z nimi wartości przesunięć poziomów napięć oraz odwrotnie proporcjonalne do amplitudy aktualnie związanych z nimi sygnałów. Z tego względu przy zamianie sygnałów miejscami wartości poprawek δ_1 i δ_2 pozostają niezmiennione, a poprawki δ_A i δ_B zmieniają się na δ'_A i δ'_B , proporcjonalne do zmiany amplitudy aktualnie podawanego odpowiednio na wejście A lub B sygnału. Równanie na pomiar fazy przybiera wtedy postać:

$$\varphi' = \frac{T - \tau}{T} \cdot 360^\circ = \frac{\tau''}{T} \cdot 360^\circ - \delta_2 + \delta_1 + \delta'_A - \delta'_B, \quad (4)$$

gdzie: τ'' – aktualnie mierzony przedział czasu przy pomiarze fazy.

Ze względu na równoważność zapisów wartości fazy φ , $\varphi - 360^\circ$ i $\varphi + 360^\circ$, przyjmując dla φ' zapis bliższy liczbie przeciwnej do wartości φ , odjęcie równań (3) i (4) stronami i podzielenie przez 2 prowadzi do wyniku:

$$\varphi = \frac{\tau' + (T - \tau'')}{2T} \cdot 360^\circ - \delta_1 + \delta_2 + \frac{(\delta_A - \delta'_A) - (\delta_B - \delta'_B)}{2}. \quad (5)$$

Dodatkowe wykonanie pomiarów dodatkich szerokości połówkowych t_1 i t_2 sygnałów mierzonego i odniesienia, przy tych samych nastawach poziomów wyzwalania i pozostałych parametrach kana-

łów wejściowych A i B, z wyjątkiem zmiany kierunku nachylenia zbrocza w kanale B, pozwala na wyeliminowanie wpływu poprawek δ_1 i δ_2 , tzn.

$$\varphi = \frac{\tau' + (T - \tau'') - t_1 + t_2}{2T} \cdot 360^\circ + \delta_{hB}, \quad (6)$$

gdzie: δ_{hB} – niewyeliminowana poprawka na szerokość histerezy wyzwalania w kanale B wprost proporcjonalna do różnicy odwrotności amplitud sygnałów.

4. Praktyka pomiarów

Uzyskane równania pomiaru fazy (5) i (6) upraszczają się przy sprowadzeniu sygnałów do jednakowych amplitud, np. poprzez zastosowanie rezystancyjnego dzielnika napięcia, ze względu na redukcję w tym przypadku wpływu poprawek związanych z niezerowymi poziomami wyzwalania na wejściach A i B oraz histerezą wyzwalania na wejściu B. Jednak dodatkowo może pojawić się wówczas znaczący wpływ opóźnienia wprowadzanego przez dzielnik napięcia, ale opóźnienie to łatwo jest weryfikowalne poprzez typowe w metrologii czasu i częstotliwości pomiary opóźnienia propagacji sygnału przez ten układ lub analizę wyników serii pomiarów tej samej różnicy faz dla kilku różnych wartości częstotliwości. Przy wyższych częstotliwościach, wartości dodatkowych opóźnień wnoszonych przez poszczególne elementy układu pomiarowego mają także coraz większy wpływ na wynik końcowy. Z kolei zastosowanie sprzężenia AC do wyeliminowania składowych stałoprądowych sygnałów zeruje poprawki δ_1 i δ_2 , ale jednocześnie może spowodować zauważalną zmianę wartości mierzonej fazy.

Dużą rolę odgrywa też źródło sygnałów o ustalonej różnicy faz. Przy zastosowaniu cyfrowej syntezy stałość odtwarzanej różnicy faz jest zwykle zachowywana, natomiast brak czystości widmowej sygnałów, nieliniowość i niejednorodność układów formujących przebieg i amplitudę sygnałów, niejednakowość opóźnień wewnętrznych oraz dynamika procesu generacji sygnałów powodują, że na niepewność pomiaru fazy ma duży wpływ źródło mierzonych sygnałów [4]. Każdorazowa zmiana nastaw parametrów generowanych sygnałów powoduje zwykle zmianę wewnętrznych warunków generacji tych sygnałów, co prowadzi często do zmiany wartości błędu odtwarzania. Z kolei na wynik pomiaru fazy wykonanego za pomocą fazomierza duży wpływ ma procedura jego kalibracji przed rozpoczęciem pomiarów.

5. Podsumowanie

W wyniku powyższych rozważań podjęto się w Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar wykonywania precyzyjnych pomiarów różnicy faz sygnałów napięciowych za pomocą częstotściomierza-czasomierza cyfrowego. Dzięki zastosowaniu prezentowanej w niniejszym artykule procedury, zminimalizowano udział systematycznych składowych niepewności i uzyskano wiarygodną metodę weryfikacji dokładności odtwarzania ustalonej różnicy faz między sygnałami – podczas wzorcowania kalibratorów, oraz dokładności pomiaru fazy – podczas wzorcowania fazomierzy. Jest to odpowiedź na zewnętrzne i wewnętrzne zainteresowanie wzorcowaniami w tym zakresie, gdyż w Polsce nie ma obecnie laboratorium akredytowanego na wykonywanie tego typu wzorcowań.

6. Literatura

- [1] Timer/counter/Analyzer. CNT-90. User's manual. Pendulum Instruments AB, Szwecja, 2004.
- [2] Agilent 53131A/132A. 225 MHz Universal Counter. Operating Guide. Agilent Technologies Inc., Malezja, 1999.
- [3] Digital Phasemeter. Model 6500A. Operating and Maintenance Manual. Krohn-Hite Corporation, USA, 1983.
- [4] 5520A Multi-Product Calibrator. Service manual. Fluke Corporation, USA, 2002.