

Andrzej KAŻMIERCZAK, Andrzej KRUSZYŃSKI, Paweł ZAWADZKI
ZAKŁAD ELEKTRYCZNY, GŁÓWNY URZĄD MIAR,
ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa

Komparacja Termicznych Przetworników Wartości Skutecznej metodą dwukanałową – szacowanie niepewności przy przenoszeniu jednostki napięcia AC

Dr inż. Andrzej KAŻMIERCZAK

Studia na wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej ukończył w 2002 r. W latach 2003 – 2009 zajmował się badaniem różnych aspektów funkcjonowania optyki zintegrowanej. W dziedzinie tej opublikował ok. 40 publikacji naukowych a w 2007 r. obronił pracę doktorską. Od 2009 r. st. metrolog w GUM, gdzie zajmuje się zagadnieniami związanymi z wzorcami napięć i prądów przemiennych.



e-mail: ac.dc.wielkosci@gum.gov.pl

Mgr inż. Andrzej KRUSZYŃSKI

Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej ukończył w 1974 r. Od 2000 r. st. metrolog w Głównym Urzędzie Miar, specjalista w dziedzinie zastosowań przetworników termicznych AC/DC jako wzorców napięcia i prądu przemiennego.



e-mail: ac.dc.wielkosci@gum.gov.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono rolę, jaką spełniają termiczne przetworniki wartości skutecznej (TVC) dla zapewnienia spójności pomiarowej w zakresie napięć AC niskich częstotliwości (do 1 MHz) w Głównym Urzędzie Miar (GUM). Przedstawiono metodę pomiarową komparacji dwukanałowej stosowaną w GUM do wzorcowania termicznych przetworników AC/DC wartości skutecznej napięcia elektrycznego przemiennego (AC). W drugiej części opisano procedurę szacowania niepewności dla tej metody i przedstawiono przykładowy budżet niepewności. Przedstawiono także przykładowe wyniki porównania wzorcowań przetwornika termicznego przeprowadzonych w GUM i w PTB (Niemcy) potwierdzające poprawność stosowanej metody komparacji.

Słowa kluczowe: napięcie AC, spójność pomiarowa, wzorcowanie, niepewność pomiaru, przetworniki termiczne wartości skutecznej.

Dual – channel comparison of AC-DC Thermal Voltage Converters (TVCs) - uncertainty analysis for AC voltage unit transfer

Abstract

The paper discusses thermal voltage converters (TVC) as reference standards for low AC voltages. The Central Office of Measures (GUM) in Warsaw, Poland, like many other NMIs, uses TVCs as reference standards for AC voltages. More precisely, a set of single-junction Holt Model 11 TVCs is used as a reference standard for AC voltages above 600 mV, while a semiconductor multi-range Fluke 792A TVC serves as a highest level working standard for these voltages and as a reference standard for the AC voltages below 600 mV. The precise traceability chart for AC voltages is shown in Fig. 2. The AC voltage unit is transferred at GUM using the dual – channel method for TVC comparison. This method is discussed and schematic of the measurement system is shown in Fig. 5. The consecutive equation describing an AC-DC difference of the TVC is discussed (equations (3) and (4)). The full analysis of the uncertainty budget is performed following the JCGM guide recommendations. Finally, two practical examples of the experimental results are given. In the first example a Fluke 792A TVC calibration at 10 V AC and 1 kHz is analysed and the measurement uncertainty is calculated (Tab. 1). In the second example the calibration results obtained at GUM and at PTB are compared

Inż. Paweł ZAWADZKI

Studia na wydziale Elektrotechniki Politechniki Warszawskiej ukończył w 2010 r. Od 1998 r. jest zatrudniony w GUM, obecnie na stanowisku gł. metrologa. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z wzorcami napięć i prądów przemiennych i utrzymaniem tych wzorców, a także transferem jednostek miar wielkości elektrycznych na kalibratory i multimetry cyfrowe.



e-mail: ac.dc.wielkosci@gum.gov.pl

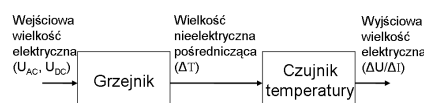
for the same Fluke 792A TVC at 600 mV and frequencies ranging from 10 Hz to 1 MHz (Fig. 6).

Keywords: AC voltage, traceability, calibration, measurement uncertainty, thermal voltage converters.

Zasadniczym przedmiotem działania Laboratorium Wielkości Elektrycznych Małej Częstotliwości jest prowadzenie prac metrologicznych związanych z przekazywaniem jednostek miar wielkości elektrycznych na laboratoryjne przyrządy pomiarowe takie jak multimetry cyfrowe i kalibratory. Jedną z tych wielkości jest napięcie elektryczne przemiennie (ACV) niskich częstotliwości. Obecnie na świecie prowadzone są intensywne prace mające na celu opracowanie i wdrożenie do stosowania wzorców pierwotnych napięcia AC opartych np. o zjawiska kwantowe, czy też wykorzystujących układy cyfrowe lub mikro i nanoelektromechaniczne. Jednak w dalszym ciągu, jako podstawowy typ wzorca dla napięć AC stosowane są termiczne przetworniki wartości skutecznej (RMS), pozwalające na odniesienie wartości RMS napięcia AC do wzorcowej wartości napięcia DC.

1. Termiczne przetworniki wartości skutecznej

Najdokładniejszą ze stosowanych obecnie metod pomiaru wartości skutecznej jest metoda termiczna, bazująca na definicji wartości skutecznej napięcia przemiennego, jako równej wartości napięcia stałego wywołującego ten sam efekt cieplny. Koncepcja termicznego przetwornika wartości skutecznej napięcia AC (ang. Thermal Voltage Converter TVC) została rozwinięta w latach 50-tych XX wieku [1] i bazuje na porównaniu dwóch wejściowych wielkości elektrycznych - napięcia AC z dokładnie znanym napięciem DC za pośrednictwem wielkości nieelektrycznej (przyrost temperatury), która następnie przetwarzana jest na wyjściową wielkość elektryczną (siła termoelektryczna, bądź przyrost prądu emitera tranzystora). Proces ten przedstawia rys. 1 [2].



Rys. 1. Schemat funkcjonalny działania przetwornika termicznego wartości skutecznej napięcia elektrycznego

Fig. 1. Principles of TVC operation

Podstawowym parametrem metrologicznym każdego przetwornika TVC jest błąd transferowy, zwany też różnicą transferową przetwornika. Błąd ten, zgodnie z jego definicją, można opisać matematycznie za pomocą następującego wzoru:

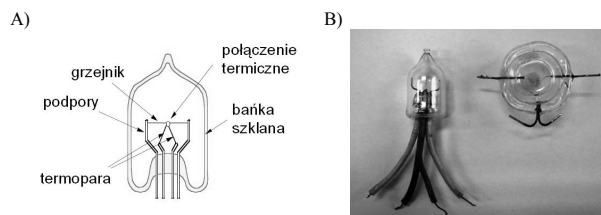
$$\delta_t = \frac{U_{AC} - U_{DC}}{U_{DC}} \Big|_{E_{AC}=E_{DC}} \quad (1)$$

gdzie: δ_t - błąd transferowy przetwornika, U_{AC} - wartość skuteczna napięcia wejściowego AC przetwornika, U_{DC} - wartość napięcia wejściowego DC przetwornika, E_{AC} - napięcie wyjściowe przetwornika przy sygnale wejściowym AC, E_{DC} - napięcie wyjściowe przetwornika przy sygnale wejściowym DC.

Znajomość tego parametru pozwala na wyznaczenie wartości skutecznej napięcia przemiennego podanego na wejście przetwornika w odniesieniu do znanego napięcia DC.

TVC można podzielić pod względem zasady działania na termoelektryczne (jednozłączowe, wielozłączowe) oraz tranzystorowe. W GUM stosowane są przetworniki jednozłączowe oraz przetwornik tranzystorowy. Ich konstrukcja oraz działanie zostanie opisane dokładniej.

Najstarszą konstrukcją są przetworniki jednozłączowe. Głównym elementem tego typu przetworników jest drut oporowy, pełniący rolę grzejnika, z dołączoną izolowaną galwanicznie termoparą. Całość urządzenia umieszczona jest wewnątrz próżniowej bańki szklanej, co zilustrowano na rys. 2.

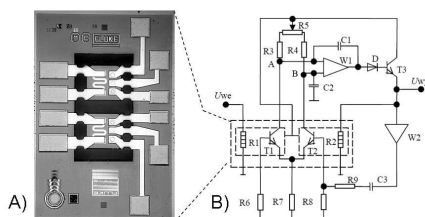


Rys. 2. Jednozłączowy przetwornik termoelektryczny wartości skutecznej AC/DC. A) schemat budowy, B) fotografia

Fig. 2. Single-junction TVC: A) schematics, B) photograph

Grzejnik przetwornika wykonany jest z niemagnetycznego drutu o wysokiej rezystywności (typowa rezystancja wejściowa grzejnika to 25 Ω bądź 90 Ω). Dla prądu znamionowego przetwornika temperatura grzejnika wynosi około 150 $^{\circ}\text{C}$, co powoduje powstanie siły termoelektrycznej termopary równej około 7 mV. Przetworniki jednozłączowe charakteryzują się dużą długookresową stabilnością parametrów oraz nieliniową charakterystyką przetwarzania (wykładnik funkcji przetwarzania $n = 1,6 - 2,0$).

Drugim typem przetwornika termicznego stosowanego w GUM jest przetwornik tranzystorowy, którego fotografię mikroskopową [3] oraz schemat zastępczy [4] pokazano na rys. 3.



Rys. 3. TVC półprzewodnikowy. A) fotografia mikroskopowa, B) schemat zastępczy

Fig. 3. Semiconductor TVC: A) microscope image, B) schematics

W przetworniku tym rolę czujnika termoelektrycznego pełni tranzystor bipolarny npn. Układ przetwornika składa się z dwóch monolitycznych płytek scalonych, izolowanych termicznie od otoczenia. Są one umieszczone w obudowie próżniowej i podtrzymywane jedynie przez doprowadzenia kontaktów. Każda z płytek zawiera rezystor dyfuzyjny pełniący rolę grzejnika, oraz tranzystor bipolarny. Zastosowanie dwóch przetworników podłączonych do wzmacniacza różnicowego pozwala na eliminację wpływu zmian temperatury otoczenia. Dzięki swojej konstrukcji przetworniki te mają wiele korzystnych cech np. małe termiczne stałe czasowe oraz dużą czułość. Dzięki budowie monolitycznej

przetworniki tranzystorowe mają także bardziej powtarzalne parametry przy masowej produkcji.

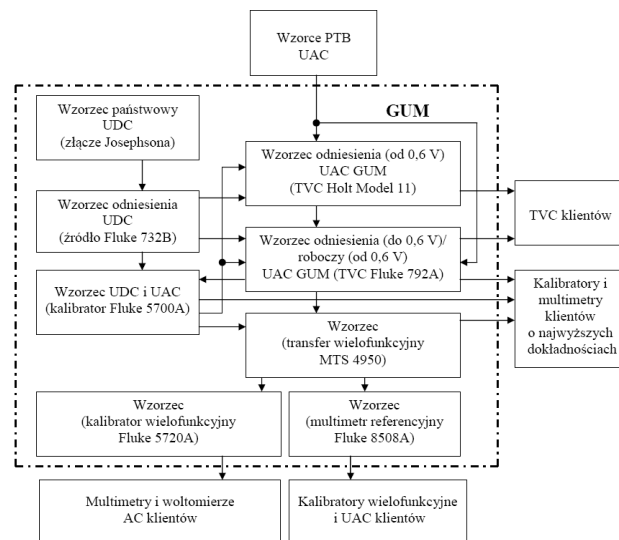
2. Przetworniki termiczne wartości skutecznej w schemacie spójności pomiarowej GUM

Podobnie jak w innych Krajowych Instytutach Metrologicznych, tak i w GUM rolę wzorców odniesienia dla napięć AC pełnią przetworniki TVC. W konkretnym rozwiązaniu sprzętowym jest to zestaw przetworników termicznych Holt Model 11, w skład którego wchodzi termoelementy i rezystory rozszerzające zakresy pomiarowe [4]. Zestaw ten pozwala na odniesienie wartości skutecznej napięcia AC do wzorcowej wartości napięcia DC w zakresie napięć 0,6 V – 1 kV i częstotliwości od 10 Hz do 1 MHz. Błąd transferowy tego wzorca jest odnoszony do wzorca PTB (Niemcy), natomiast napięcie DC jest powiązane ze wzorcem państwowym napięcia elektrycznego stałego utrzymywanym w GUM (złącze Josephsona) poprzez wzorec napięcia DC – stabilne źródło o wartości 10 V, wykorzystujące w swej budowie właściwości diody Zenera.

W zakresie niskich napięć (poniżej 0,6 V) funkcję wzorca odniesienia GUM pełni wielozakresowy półprzewodnikowy przetwornik termiczny Fluke 792A, również odnoszony do wzorca PTB.

Dla zakresu napięcia powyżej 0,6 V przetwornik Fluke 792A jest porównywany w GUM z przetwornikiem Holt Model 11 i używany do wzorcowania kalibratorów i multimetrów, gdy wymagana jest szczególnie duża dokładność pomiarów. Jednostka napięcia przemiennego przenoszona jest z przetwornika Fluke 792A na wzorec Datron 4950 MTS, a następnie na wzorce robocze: kalibrator Fluke 5720 i multimetry referencyjne Fluke 8508 stosowane do wzorcowania przyrządów pomiarowych klientów.

Ogólny schemat spójności pomiarowej dla wzorcowań w zakresie napięć przemiennych w GUM przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat spójności pomiarowej GUM przy przenoszeniu jednostki napięcia AC

Fig. 4. Traceability chart for GUM for the AC voltage unit

3. Komparacja przetworników termicznych

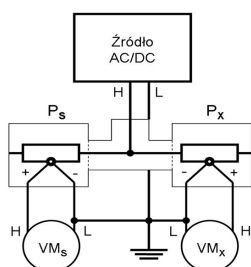
Przeniesienie jednostki napięcia przemiennego z przetwornika odniesienia na przetwornik wzorcowany dokonywane jest w procesie komparacji. Praktyczne zastosowanie definicji błęd transferowych opisanej równaniem (2) jest trudne z uwagi na konieczność spełnienia warunku $E_{AC} = E_{DC}$. Dlatego też dąży się jedynie do uzyskania zbliżonej wartości E_{AC} i E_{DC} .

W GUM stosowana jest komparacja dwukanałowa [6]. Polega ona na równoczesnym pomiarze napięć wyjściowych obu przetworników (wzorcowego i wzorcowanego), na których wejście

podawane jest to samo napięcie. Napięcie wejściowe podawane jest w sekwencji pomiarowej składającej się z pięciu kroków: kolejno $U_{AC}, +U_{DC}, U_{AC}, -U_{DC}, U_{AC}$.

Arytmetyczne uśrednienie dwóch wartości napięć wyjściowych, będących odpowiedziami przetwornika na wejściowe napięcia $+U_{DC}$ i $-U_{DC}$, minimalizuje błąd rewersji. Analogiczne uśrednienie trzech wartości napięć wyjściowych, odpowiadających napięciom wejściowym U_{AC} , pozwala na zmniejszenie krótkookresowego dryftu TVC. Dla potrzeb analizy statystycznej wyników wykonywane jest 12 takich sekwencji. Cechą charakterystyczną metody dwukanałowej jest to, że wartości napięć U_{AC} i U_{DC} nie muszą być sobie równe.

Układ pomiarowy stosowany w GUM przedstawiony jest schematycznie na rys. 5.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego stosowanego w GUM do dwukanałowej komparacji TVC

Fig. 5. Schematics of the measurement circuit for dual – channel TVC comparison

Różnicę transferową przetwornika wzorcowanego oblicza się zgodnie z następującym równaniem [5]:

$$\Delta_X = \frac{E_{SAC} - E_{SDC}}{n_S \cdot E_{SDC}} - \frac{E_{XAC} - E_{XDC}}{n_X \cdot E_{XDC}} + \Delta_S \quad (2)$$

gdzie: Δ_X - różnica transferowa TVC wzorcowanego, E_{XAC} - wartość napięcia na wyjściu wzorcowanego TVC przy wejściowym sygnale AC obliczona jako średnia z trzech wyników uzyskanych w pierwszym, trzecim i piątym kroku sekwencji pomiarowej, E_{XDC} - wartość napięcia na wyjściu wzorcowanego TVC przy wejściowym sygnale DC obliczona jako średnia z dwóch wyników uzyskanych w drugim i czwartym kroku sekwencji pomiarowej, E_{SAC} - wartość napięcia na wyjściu wzorcowanego TVC przy wejściowym sygnale AC obliczona analogicznie jak E_{XAC} , E_{SDC} - wartość napięcia na wyjściu wzorcowanego TVC przy wejściowym sygnale DC obliczona analogicznie jak E_{XDC} , n_X - wykładnik funkcji przetwarzania TVC wzorcowanego, n_S - wykładnik funkcji przetwarzania TVC wzorcowanego, Δ_S - poprawka TVC wzorcowanego (parametr ze świadectwa wzorcowania przetwornika wzorcowanego).

3.1. Równanie pomiaru i szacowanie niepewności dla komparacji TVC metodą dwukanałową

Równanie pomiaru różnicy transferowej przetwornika wzorcowanego (Δ_X) można wyrazić, jako sumę: różnicy pomiarowej (Δ_B), poprawki wynikającej z braku powtarzalności wyników z serii pomiarowej (Δ_A) oraz poprawki przetwornika wzorcowanego (Δ_S) przy pomocy następującego równania:

$$\Delta_X = \Delta_B + \Delta_A + \Delta_S \quad (3)$$

gdzie:

$$\Delta_B = \frac{E_{SAC} - E_{SDC}}{n_S \cdot E_{SDC}} - \frac{E_{XAC} - E_{XDC}}{n_X \cdot E_{XDC}} \quad (4)$$

Niepewność pomiaru można wyrazić, jako geometryczną sumę niepewności składników Δ_A , Δ_B i Δ_S

$$u(\Delta_X) = \sqrt{u(\Delta_B)^2 + u(\Delta_A)^2 + u(\Delta_S)^2} \quad (5)$$

przy czym: $u(\Delta_A)$ - niepewność poprawki wynikającej z braku powtarzalności wyników z serii pomiarowej Δ_A jest liczona metodą typu A i jest odchyleniem standardowym eksperymentalnym średniej wyników serii pomiarowej, $u(\Delta_S)$ - niepewność różnicy transferowej przetwornika wzorcowanego Δ_S jest niepewnością szacowaną metodą typu B, a jej wartość uzyskana jest ze świadectwa wzorcowania przetwornika wzorcowanego, $u(\Delta_B)$ - niepewność składnika Δ_B liczona metodą typu B, którą można przedstawić w postaci sumy geometrycznej niepewności składników, od których zależy Δ_B , pomnożonych przez odpowiadające im współczynniki wrażliwości (7), zgodnie z metodą przedstawioną w przewodniku „Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement” (GUM) [6].

$$u(\Delta_B) = \sqrt{c_1^2 \cdot u(E_{SAC})^2 + c_2^2 \cdot u(E_{SDC})^2 + c_3^2 \cdot u(n_S)^2 + c_4^2 \cdot u(E_{XAC})^2 + c_5^2 \cdot u(E_{XDC})^2 + c_6^2 \cdot u(n_X)^2} \quad (6)$$

Współczynniki wrażliwości $c_1 \div c_6$ są pochodnymi cząstkowymi równania pomiaru po odpowiadających im składnikach równania

$$c_1 = \frac{d\Delta_X}{dE_{SAC}} = \frac{1}{n_S \cdot E_{SDC}} \quad (7)$$

$$c_2 = \frac{d\Delta_X}{dE_{SDC}} = \frac{E_{SAC}}{n_S} \left(-\frac{1}{E_{SDC}^2} \right) \quad (8)$$

$$c_3 = \frac{d\Delta_X}{dn_S} = \frac{E_{SAC} - E_{SDC}}{E_{SDC}} \left(-\frac{1}{n_S^2} \right) \quad (9)$$

$$c_4 = \frac{d\Delta_X}{dE_{XAC}} = -\frac{1}{n_X \cdot E_{XDC}} \quad (10)$$

$$c_5 = \frac{d\Delta_X}{dE_{XDC}} = \frac{E_{XAC}}{n_X} \left(\frac{1}{E_{XDC}^2} \right) \quad (11)$$

$$c_6 = \frac{d\Delta_X}{dn_X} = \frac{E_{XAC} - E_{XDC}}{E_{XDC}} \left(\frac{1}{n_X^2} \right) \quad (12)$$

W rezultacie równanie niepewności pomiaru przy komparacji przetworników termicznych przyjmuje następującą postać:

$$u(\Delta_X) = \sqrt{c_7^2 \cdot u(\Delta_A)^2 + c_1^2 \cdot u(E_{SAC})^2 + c_2^2 \cdot u(E_{SDC})^2 + c_3^2 \cdot u(n_S)^2 + c_4^2 \cdot u(E_{XAC})^2 + c_5^2 \cdot u(E_{XDC})^2 + c_6^2 \cdot u(n_X)^2 + c_8^2 \cdot u(\Delta_S)^2} \quad (13)$$

Budżet niepewności przedstawiony w tabeli 1.

4. Analiza wybranych przykładów

Dla zilustrowania opisanej metody przeanalizowany został przypadek, kiedy przy użyciu wzorca odniesienia GUM (TVC Holt Model 11) przeprowadzono wzorcowanie wzorca roboczego (TVC Fluke 792A). Wzorcowanie to wykonano dla napięcia 10 V i dla częstotliwości 1 kHz. Zostało ono przeprowadzone metodą dwukanałową przy zastosowaniu schematu połączeń jak na rys. 5. Źródłem sygnału napięciowego AC/DC był kalibrator Fluke 5720. Sygnał napięciowy z kalibratora podłączono przy użyciu trójnika równolegle na wejścia obu przetworników. Sygnał wyjściowy przetwornika wzorcowanego był mierzony przy użyciu nanowoltomierza Keithley 2182A, natomiast sygnał wyjściowy przetwornika wzorcowanego mierzony był multimetrem cyfrowym Datron Wawetek 1281.

Tab. 1. Budżet niepewności dla komparacji TVC metoda dwukanałowa
Tab. 1. Uncertainty budget for the dual – channel method for TVC comparisons

Symbol wielkości	Estymata wielkości	Niepewność standardowa	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości	Udział w złożonej niepewności standardowej
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
Δ_A	δ_A	$u(\delta_A)$	normalny	$c_7 = 1$	$c_7 u(\delta_A)$
E_{SAC}	e_{SAC}	$u(e_{SAC})$	trapezowy	$c_1 = \frac{1}{n_S \cdot E_{SDC}}$	$c_1 u(e_{SAC})$
E_{SDC}	e_{SDC}	$u(e_{SDC})$	trapezowy	$c_2 = \frac{E_{SAC}}{n_S} \left(-\frac{1}{E_{SDC}^2} \right)$	$c_2 u(e_{SDC})$
n_S	n_s	$u(n_s)$	normalny	$c_3 = \frac{E_{SAC} - E_{SDC}}{E_{SDC}} \left(-\frac{1}{n_S} \right)$	$c_3 u(n_S)$
E_{XAC}	e_{XAC}	$u(e_{XAC})$	trapezowy	$c_4 = -\frac{1}{n_X \cdot E_{XDC}}$	$c_4 u(e_{XAC})$
E_{XDC}	e_{XDC}	$u(e_{XDC})$	trapezowy	$c_5 = \frac{E_{XAC}}{n_X} \left(\frac{1}{E_{XDC}^2} \right)$	$c_5 u(e_{XDC})$
n_X	n_x	$u(n_x)$	normalny	$c_6 = \frac{E_{XAC} - E_{XDC}}{E_{XDC}} \left(\frac{1}{n_X} \right)$	$c_6 u(n_X)$
Δ_S	δ_S	$u(\delta_S)$	normalny	$c_8 = 1$	$c_8 u(\delta_S)$
Δ_X	δ_X				$u(\delta_X)$

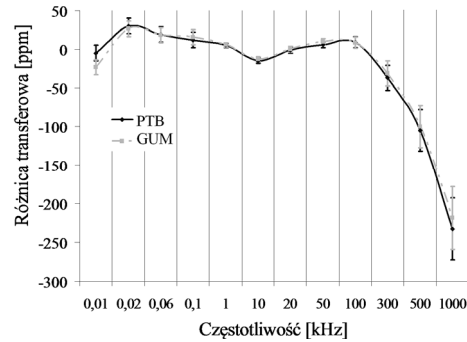
Tab. 2. Budżet niepewności komparacji TVC Fluke 792A z przetwornikiem wzorcowym Holt Model 11 dla punktu pomiarowego 10 V i 1 kHz
Tab. 2. Uncertainty budget for Fluke type 792A TVC comparison with a standard single – junction Holt Model 11 TVC at 10 V and 1 kHz

Symbol wielkości	Estymata wielkości	Niepewność standardowa	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości	Udział w złożonej niepewności standardowej
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
Δ_A	0 $\mu\text{V/V}$	0,101 $\cdot 10^{-6}\text{V/V}$	normalny	1	1,01 $\cdot 10^{-7}\text{V/V}$
E_{SAC}	6,639517 $\cdot 10^{-3}\text{V}$	4,34 $\cdot 10^{-9}\text{V}$	trapezowy	75,740 1/V	3,29 $\cdot 10^{-7}\text{V/V}$
E_{SDC}	6,639457 $\cdot 10^{-3}\text{V}$	4,34 $\cdot 10^{-9}\text{V}$	trapezowy	-75,740 1/V	-3,29 $\cdot 10^{-7}\text{V/V}$
n_S	1,989 V/V	5,91 $\cdot 10^{-4}\text{V/V}$	normalny	-2,321 $\cdot 10^{-6}\text{V/V}$	-1,37 $\cdot 10^{-9}\text{V/V}$
E_{XAC}	9,023220 $\cdot 10^{-1}\text{V}$	1,87 $\cdot 10^{-7}\text{V}$	trapezowy	-1,109 1/V	-2,07 $\cdot 10^{-7}\text{V/V}$
E_{XDC}	9,023210 $\cdot 10^{-1}\text{V}$	1,87 $\cdot 10^{-7}\text{V}$	trapezowy	1,109 1/V	2,07 $\cdot 10^{-7}\text{V/V}$
n_X	1,000 V/V	8 $\cdot 10^{-5}\text{V/V}$	normalny	1,138 $\cdot 10^{-6}\text{V/V}$	9,10 $\cdot 10^{-11}\text{V/V}$
Δ_S	-0,8 $\mu\text{V/V}$	1 $\cdot 10^{-6}\text{V/V}$	normalny	1	1,00 $\cdot 10^{-6}\text{V/V}$
Δ_X	2,68 $\mu\text{V/V}$				1,15 $\mu\text{V/V}$

W budżecie niepewności najistotniejszym składnikiem jest niepewność przetwornika wzorcowego $u(\delta_S)$. W dalszej kolejności wpływ na niepewność komparacji mają niepewności wynikające z rozdzielczości stosowanych mierników. Najmniej istotnymi czynnikami wpływającymi na niepewność pomiaru są niepewności wyznaczenia wykładników funkcji przetwarzania TVC.

W celu sprawdzenia poprawności pomiarów dokonywanych w GUM porównano wyniki wzorcowania przetwornika Fluke 792A względem przetwornika Holt Model 11 (wzorcowanego w PTB) z wynikami wzorcowania tego samego przetwornika Fluke 792A przeprowadzonego w PTB. Porównania wyników dokonano dla wartości napięcia 600 mV, w zakresie częstotliwości 10 Hz – 1 MHz.

Wyniki uzyskane w GUM zostały przedstawione na tle wyników wzorcowania w PTB na rys. 6.



Rys. 6. Porównanie wyników wzorcowania przetwornika Fluke 792A dokonanych w GUM i w PTB

Fig. 6. Comparison of calibration results for Fluke 792A TVC obtained at GUM and at PTB

Wyniki wzorcowania przeprowadzonego w GUM pokrywają się z wynikami wzorcowania dokonanego w PTB. Uzyskano dużą zbieżność obu krzywych charakterystyk częstotliwościowych błędów transferowych przetwornika.

Największe rozbieżności, wystąpiły dla skrajnych wartości częstotliwości (10 Hz oraz 1 MHz). W przypadku punktu pomiarowego 1 MHz wyznaczone błędy transferowe przetwornika mieszczą się w zakresach niepewności pomiarów, a w przypadku 10 Hz zakresy niepewności tylko częściowo zachodzą na siebie. Obecnie prowadzone są prace zmierzające do wykrycia przyczyn owych rozbieżności.

5. Podsumowanie

Omówiony przykład budżetu niepewności dotyczy tylko jednego, wybranego punktu pomiarowego. Wzorcowanie przetwornika w pełnym zakresie pomiarowym przeprowadza się dla wielu punktów pomiarowych w zakresie napięcia i częstotliwości. Czynniki to tę czynność bardzo pracochłonną - czas komparacji jednego punktu pomiarowego wynosi ok. 40 minut, przy zastosowaniu oprogramowania do pomiarów automatycznych.

Przedstawiony przykład porównania wyników pomiarów dokonanych przez GUM i PTB, pozwala na postawienie tezy o poprawności metody pomiarowej komparacji dwukanałowej przetworników TVC stosowanej w GUM.

6. Literatura

- [1] Hermach F. L.: Thermal Converters as AC-DC Transfer Standards for Current and Voltage Measurements at Audio Frequencies, J. Res. Natl. Bur. Stand. 48, 121-138 (1952).
- [2] Kampik M., Miłek M.: Przetworniki termiczne w pomiarach wartości skutecznej prądu. Metrologia i Systemy Pomiarowe, monografia 7, Warszawa 1992.
- [3] www.fluke.com
- [4] Barański A., Ratajczak J., Zawadzki P.: Przetworniki termoelektryczne AC/DC jako wzorce napięcia przemiennego”, PAK 2007 nr 9bis, s. 38-41.
- [5] Kampik M.: Stanowisko do wzorcowania termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego. Przegląd Elektrotechniczny, 1, 239-244 (2010).
- [6] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 2008.