

# Systemy pomiarowe do badań podstawowych parametrów termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego

**Streszczenie.** Wartość skuteczna napięcia przemiennego jest jedną z najczęściej mierzonych wielkości elektrycznych. Pomimo spektakularnego rozwoju kwantowych wzorców napięcia, termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS) są nadal wykorzystywane, szczególnie w kalibracjach realizowanych w Narodowych Instytutach Metrologicznych (National Metrology Institute, NMI). W artykule przedstawiono trzy układy pomiarowe stosowane do pomiarów najistotniejszych parametrów TPWS: wykładnika charakterystyki przetwarzania, błędu rewersji oraz różnicy transferowej w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 100 MHz.

**Abstract.** The root-mean-square (rms) value of alternating voltage (AC) is one of the most frequently measured electrical quantities. Despite the spectacular development of quantum voltage standards, thermal voltage converters (TVC) are still used, especially in calibrations carried out at National Metrological Institutes. The article presents three measurement systems used to measure the most important TVC parameters: the exponent of the transfer characteristic, the reversal error and the AC-DC transfer difference in the frequency range from 1 kHz to 100 MHz. (Measuring systems for testing the basic thermal parameters of AC voltage transducers)

**Keywords:** AC voltage standard, root-mean-square value, AC-DC transfer difference, thermal converters

**Słowa kluczowe:** wzorzec napięcia przemiennego, wartość skuteczna napięcia, różnica transferowa AC-DC, przetworniki termiczne

## Wstęp

Obecnie najdokładniejszą metodą wyznaczania wartości skutecznej napięcia przemiennego na wyjściu kalibrowanego urządzenia pomiarowego lub generatora (ang. *Device Under Test*, DUT), jest komparacja z napięciem przemiennym, uzyskanym za pomocą kwantowego wzorca napięcia wykorzystującego zjawisko Josephsona (ang. *Josephson AC Voltage Standard*, JAVS) [1]. Do wzorców kwantowych o relatywnie najprostszej konstrukcji należy programowalny kwantowy wzorzec napięcia przemiennego (ang. *Programmable Josephson Voltage Standard*, PJVS) będący, z uwagi na swoją zasadę działania, kwantowym odpowiednikiem przetwornika cyfrowo-analogowego (C/A) [2]. Wzorzec ten generuje schodkową aproksymację sinusoidy. Wadą tej konstrukcji jest wysoka zawartość wyższych harmonicznych, związana głównie z niestabilnościami na wyjściu matrycy złącz Josephsona przy przełączaniu napięcia kolejnych „schodków”. Znaczące zmniejszenie zawartości harmonicznych uzyskuje się poprzez zastosowanie sterowania impulsowego matrycy Josephsona, w tzw. kwantowym synteźatorze przebiegów arbitralnych (ang. *Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer*, JAWS) [3]. Niestety, pomimo znacznych postępów w technologii i instrumentacji urządzenia te wytwarzają napięcie przemiennie o relatywnie dużej niepewności w paśmie częstotliwości powyżej kilkunastu kHz. Kolejną wadą jest konieczność kosztownego chłodzenia matrycy ze złączami Josephsona ciekłym helem lub stosowanie chłodziarek kriogenicznych (ang. *cryocooler*), pozwalających obniżyć temperaturę pracy matrycy złącz Josephsona do około 4 K [4]. Kolejnym istotnym ograniczeniem JAWS jest relatywnie niskie napięcie wyjściowe, które zazwyczaj nie przekracza wartości rzędu kilkudziesięciu mV dla pojedynczej matrycy liczącej kilka tysięcy złącz. Z wymienionych wyżej powodów TPWS są nadal chętnie stosowane, stanowiąc tanią alternatywę dla JAWS i jednocześnie umożliwiając pomiary i kalibracje przy wyższych napięciach oraz w szerszym zakresie częstotliwości niż źródła JAWS [5].

NMI wykorzystują kilka typów TPWS które, ze względu na konstrukcję i różnicowane parametry stosuje się w różnych przedziałach częstotliwości. Niezależnie od typu przetwornika, wyróżnia się w nim dwa podstawowe

komponenty: rezystor pełniący rolę grzejnika, zamieniający, zgodnie z prawem Joula-Lenza, wartość skuteczną wejściowego sygnału napięciowego na przyrost temperatury. W przypadku jednozłączowego termicznego przetwornika wartości skutecznej (ang. *Single Junction Thermal Converter*, SJTC) ma on postać cienkiego drutu oporowego o małej średnicy [6]. W przypadku planarnego wielozłączowego przetwornika termicznego (ang. *Planar Multijunction Thermal Converter*, PMJTC) ma formę cienkowarstwowego rezystora [7]. W przypadku kalorymetrycznego przetwornika wartości skutecznej (ang. *Calorimetric Thermal Voltage Converter*, CTVC) mikrofalowego rezystora prętowego [8]. Drugim elementem TPWS jest termoelement, odpowiedzialny za pomiar przyrostu temperatury grzejnika. Typowe rozwiązania konstrukcyjne to wykorzystanie zmiany bariery potencjału złącza P-N tranzystora bipolarnego (rozwiązanie zastosowane we wzorcu Fluke 792A [9]), termoelement jednozłączowy (w przypadku SJTC), wielozłączowy termoelement napylany próżniowo (w przypadku PMJTC), termoelement nawijany w postaci drutu konstantanowego pokrywany częściowo miedzią (zastosowany w CTVC opracowanym w National Research Council, NRC w Kanadzie) lub wytworzenie grubowarstwowego termoelementu konstantan-miedź w technologii flex-pcb, jak w przypadku CTVC, opracowanego w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej (KMEiA) [10].

Weryfikacja poprawności modelu matematycznego przetwornika termicznego wymaga wyznaczenia krytycznych parametrów metrologicznych przetwornika. Pomiar tych parametrów nie jest trywialny i wymaga opracowania odpowiednich stanowisk pomiarowych, wyposażonych w źródła napięcia stałego i przemiennego o bardzo dużej stabilności czasowej wytwarzanego napięcia.

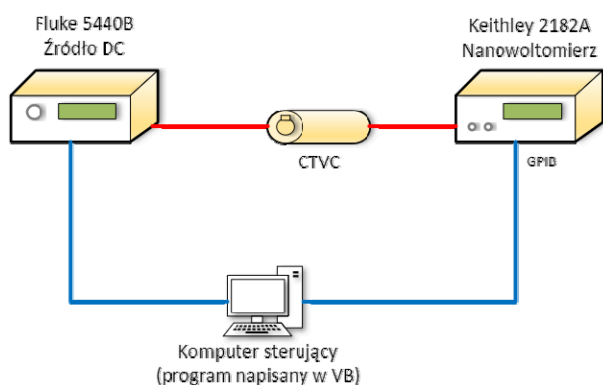
W niniejszym artykule zostaną przedstawione stanowiska pomiarowe, służące do pomiaru wykładnika funkcji przetwarzania, błędu rewersji oraz różnicy transferowej. Na przykładzie przetwornika CTVC, konstrukcji KMEiA, zostanie omówiony budżet niepewności pomiarów wykonanych przy wykorzystaniu zbudowanych stanowisk pomiarowych.

## Stanowisko pomiarowe do wyznaczania wykładnika funkcji przetwarzania

Funkcja przetwarzania przetwornika opisuje zależność między jego napięciem wyjściowym  $E$  a napięciem  $U$  podanym na jego wejście:

$$(1) \quad E = kU^n,$$

gdzie  $n$  jest wykładnikiem funkcji przetwarzania, a  $k$  pewną stałą. Wartość  $n$  zależy od konstrukcji przetwornika oraz od wartości napięcia wejściowego i dla większości TPWS zawiera się w przedziale od 1,6 do 2,0. Wykładnik charakterystyki przetwarzania jest jednym z podstawowych parametrów przetwornika. Jest on wykorzystywany w procedurze pomiaru błędu rewersji jak i różnicy transferowej TPWS oraz do linearyzacji napięcia wyjściowego przetwornika. Układ do laboratoryjnego wyznaczania wykładnika charakterystyki przetwarzania pokazano na rys. 1.



Rys.1. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania wykładnika funkcji przetwarzania TPWS

Układ pomiarowy składa się z kalibratora napięcia stałego Fluke 5440B, którego wyjście jest połączone z gniazdem wejściowym typu N przetwornika. Napięcie wyjściowe mierzone jest za pomocą nanowoltomierza Keithley 2182A.

Wykładnik charakterystyki przetwarzania TPWS wyznacza się przez podanie na wejście przetwornika napięcia stałego o zadanej wartości i pomiarze napięcia wyjściowego przetwornika. W drugim kroku, napięcie wejściowe zmieniane jest o zadaną wartość (najczęściej około 0,5%) a napięcie wyjściowe jest ponownie mierzone. Wartość wykładnika wyznacza się ze wzoru:

$$(2) \quad n = \left( \frac{E'_{DC}}{E_{DC}} - 1 \right) \left( \frac{U_{DC}}{\Delta U_{DC}} \right),$$

gdzie  $E'_{DC}$  oznacza napięcie wyjściowe przetwornika przy zmianie napięcia wejściowego  $U_{DC}$  o  $\Delta U_{DC}$ .

W celu zmniejszenia dryftów i szumów cieplnych oraz niestabilności kalibratorów, wykładnik obliczany jest jako średnia arytmetyczna z serii 10 następujących po sobie pomiarów. Niepewność wyznaczenia wykładnika zawiera składową typu A:  $u_A(n)$  oraz typu B:  $u_B(n)$ . Niepewność typu A pomiaru wyznaczana jest jako odchylenie standardowe średniej arytmetycznej. W oszacowaniu niepewności typu B, uwzględnia się niepewności pomiaru napięć wyjściowych  $u(E_{DC})$  i  $u(E'_{DC})$  oraz napięć wejściowych  $u(U_{DC})$  i  $u(U'_{DC})$ .

Ponieważ we wzorze (2) napięcie wejściowe jest wytwarzane przez ten sam kalibrator na tym samym

zakresie, to nie jest istotna wartość bezwzględna tego napięcia, a jedynie zmiana jego wartości. Niepewność tej zmiany jest traktowana jak nieliniowość przyrządu pomiarowego. Zatem, niepewności graniczne napięć wejściowych  $U_{DC}$  i  $\Delta U_{DC}$  są zdeterminowane błędami granicznymi, podanymi w dokumentacji kalibratora Fluke 5440B. Napięcia wyjściowe TPWS  $E_{DC}$  oraz  $E'_{DC}$  są mierzone tym samym nanowoltomierzem, na tym samym zakresie pomiarowym. Do wyznaczenia wykładnika funkcji przetwarzania nie jest istotna jego wartość bezwzględna, lecz tylko jego zmiana. Niepewność pomiaru jest zatem zdeterminowana przez nieliniowość przyrządu pomiarowego. Niepewności graniczne napięć wyjściowych  $E_{DC}$  i  $E'_{DC}$  są granicznymi błędami nieliniowości, definiowanymi przez producenta w nocie katalogowej nanowoltomierza Keithley 2182A.

Wykładnik charakterystyki przetwarzania CTVC opracowanego w KMEiA został zmierzony dla wybranych napięć wejściowych z przedziału od 1 do 3 V. Dla każdego z napięć wykonano serię składającą się 10 pomiarów. Wyniki pomiaru wykładnika funkcji przetwarzania badanego przetwornika dla różnych napięć wejściowych wraz z niepewnościami pomiarowymi przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Wyniki i niepewność pomiaru wykładnika charakterystyki przetwarzania CTVC w funkcji napięcia wejściowego przetwornika

Napięcie wejściowe, V	$n$	$u_A(n)$	$u_B(n)$	$u(n), k=1$	Napięcie wyjściowe $E$ , mV
1	1,981	0,002	0,001	0,002	1,54
1,5	1,965	0,001	0,001	0,001	3,42
2	1,953	0,001	0,001	0,001	5,96
2,5	1,937	0,001	0,001	0,001	9,17
3	1,919	0,001	0,001	0,001	13,0

Jak pokazano w tab. 1, najwyższa wartość wykładnika  $n$ , zmierzona przy napięciu wejściowym 1 V wynosi 1,981. Wartość ta maleje do 1,919 wraz ze wzrostem napięcia do 3 V. Jest to spadek o około 3%. Napięcie wyjściowe przetwornika wzrasta wraz z napięciem wejściowym z 1,54 mV do 13,0 mV, odpowiednio dla 1 V i 3 V napięcia wejściowego.

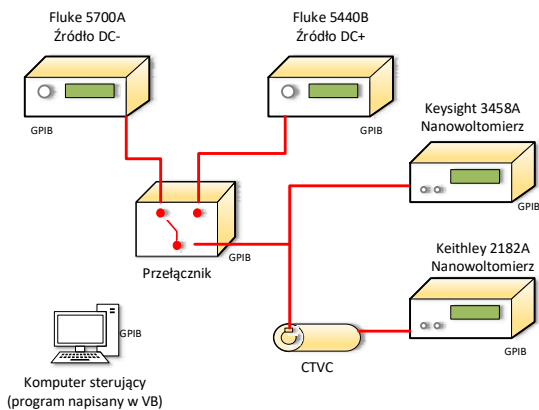
## Stanowisko pomiarowe do wyznaczania błędu rewersji

Błąd rewersji opisuje różnicę napięć wyjściowych TPWS przy zmianie polaryzacji wejściowego napięcia stałego. Błąd ten ma wpływ na wartość różnicy transferowej. Znaczna wartość błędu rewersji utrudnia korzystanie z przetwornika, w szczególności wydłuża czas stabilizacji napięcia wyjściowego przy zmianie polaryzacji napięcia wejściowego podczas pomiaru różnicy transferowej przetwornika. Błąd rewersji wyznacza się ze wzoru:

$$(3) \quad \delta_{DC+DC-} = 2 \cdot \frac{U_{DC+} + U_{DC-} \left( 1 + \frac{E_{DC-} - E_{DC+}}{nE_{DC+}} \right)}{U_{DC+} - U_{DC-} \left( 1 + \frac{E_{DC-} - E_{DC+}}{nE_{DC+}} \right)} \Bigg|_{E_{DC+} \approx E_{DC-}},$$

gdzie  $U_{DC+}$  i  $U_{DC-}$  to stałe napięcia wejściowe o takiej samej wartości, lecz przeciwnej polaryzacji, a  $E_{DC+}$  i  $E_{DC-}$  to odpowiadające im napięcia wyjściowe przetwornika.

Uproszczony schemat systemu pomiarowego do wyznaczania błędu rewersji TPWS pokazano na rys. 2.



Rys.2. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania błędu rewersji TPWS

Napięcie podawane na wejście TPWS jest wytwarzane przez kalibrator napięcia stałego. Ze względu na konstrukcję jego obwodu wyjściowego zmiana polaryzacji wymaga przełączenia kilku przełączników znacząco wydłużając czas przełączania, podczas którego na wejście badanego przetwornika nie jest podawane napięcie. Powoduje to wydłużenie czasu stabilizacji napięcia wyjściowego badanego przetwornika. Dlatego zdecydowano się w roli źródła napięcia stałego zastosować dwa kalibratory Fluke: 5440B oraz 5700A, które zostały skonfigurowane tak, aby na ich wyjściu było napięcie stałe o tej samej wartości, lecz o przeciwnej polaryzacji. Przełącznik zapewnia szybkie przełączenie (w ciągu kilku milisekund) źródła napięcia na wejściu przetwornika (CTVC). W celu zmniejszenia wpływu dryftów i niestabilności, błąd rewersji obliczany jest jako seria kilkunastu następujących po sobie pomiarów.

Podobnie jak w przypadku pomiaru wykładnika charakterystyki przetwarzania, napięcie wyjściowe przetwornika mierzone jest za pomocą pojedynczego przyrządu na jednym zakresie pomiarowym. W przypadku pomiaru błędu rewersji, zgodnie z zależnością (3), istotna jest zmiana napięcia wyjściowego przy zmianie polaryzacji napięcia wejściowego a nie jej wartość bezwzględna. Stąd niepewności pomiaru napięć wyjściowych  $E_{DC+}$  i  $E_{DC-}$  określone są również granicznymi błędami nieliniowości, definiowanymi przez producenta w notcie katalogowej nanowoltomierza Keithley 2182A.

Podobnie jak w przypadku wykładnika  $n$ , pomiar błędu rewersji CTVC opracowanego w KMEiA wykonano dla napięć wejściowych od 1 V do 3 V jako serię kilkudziesięciu pomiarów dla każdego z wybranych napięć wejściowych. Z wyników zostały usunięte wyniki pomiarów, których wartość wykroczyła poza przyjęty przedział linearyzacji charakterystyki przetwarzania CTVC ( $\pm 50 \mu\text{V/V}$ ). Zmierzone wartości błędu rewersji wraz z niepewnościami pomiarowymi zostały przedstawione w tab. 2.

Tabela 2. Wyniki i niepewność pomiaru błędu rewersji CTVC w funkcji napięcia wejściowego przetwornika

Napięcie wejściowe	$\delta_{DC+DC-}$	$u_A$	$u_B$	$u(\delta_{DC+DC-}), k=1$
V	$\mu\text{V/V}$	$\mu\text{V/V}$	$\mu\text{V/V}$	$\mu\text{V/V}$
1	86,3	1,0	4,4	4,6
1,5	58,2	0,6	2,3	2,4
2	45,5	1,1	1,5	1,9
2,5	36,3	0,7	1,2	1,4
3	29,0	0,5	5,3	5,3

Największa wartość błęd rewersji została zmierzona dla napięcia wejściowego równego 1 V i była równa około

86,3  $\mu\text{V/V}$ . Wartość tego błędu zmniejsza się do około 29  $\mu\text{V/V}$ , wraz ze wzrostem napięcia wejściowego do 3 V. Przy napięciu wejściowym 1 V oraz 2 V błąd rewersji jest odpowiednio około ośmio- i około dziewięciokrotnie mniejszy niż w przypadku CTVC opracowanego przez NRC.

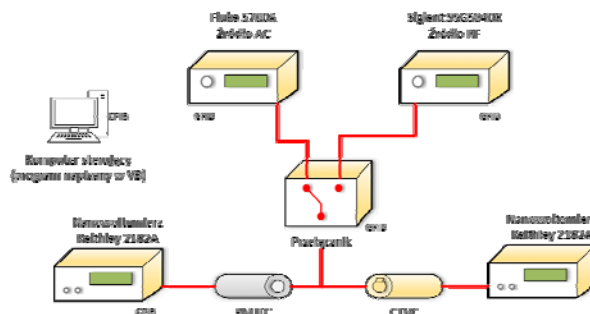
### Stanowisko pomiarowe do wyznaczania różnicy transferowej

Różnica transferowa wraz z jej niepewnością jest najważniejszym parametrem metrologicznym TPWS. Reprezentuje ona względną różnicę pomiędzy wartością skuteczną napięcia stałego i przemiennego dla której na wyjściu TPWS występuje identyczne napięcie stałe  $E$ . Różnica transferowa wyznaczana jest ze wzoru:

$$\delta_{AC-DC,x} \approx \delta_{AC-DC,s} + \frac{E_{s,AC} - E_{s,DC}}{n_s E_{s,DC}} - \frac{E_{x,AC} - E_{x,DC}}{n_x E_{x,DC}},$$

gdzie  $\delta_{AC-DC,s}$  jest różnicą transferową przetwornika wzorcowego,  $E$  jest napięciem wyjściowym przetwornika,  $n$  jest wykładnikiem funkcji przetwarzania przetwornika. Indeks „s” oznacza przetwornik wzorcowy, indeks „x” oznacza przetwornik badany, indeks „AC” oznacza napięcie przemiennie AC w procedurze AC/DC lub napięcie o wysokiej częstotliwości RF w procedurze RF/AC, indeks „DC” oznacza napięcie stałe DC w procedurze AC/DC lub napięcie o małej częstotliwości AC w procedurze RF/AC, stosowanej przy częstotliwości powyżej 1 MHz RF-AC (ang. *Radio Frequency – Alternating Current*).

Wartość różnicy transferowej zależy od częstotliwości napięcia wejściowego. Najmniejsze wartości przyjmuje dla częstotliwości z przedziału od 1 kHz do 10 kHz. Schemat stanowiska do wyznaczania różnicy transferowej pokazano na rys. 3.



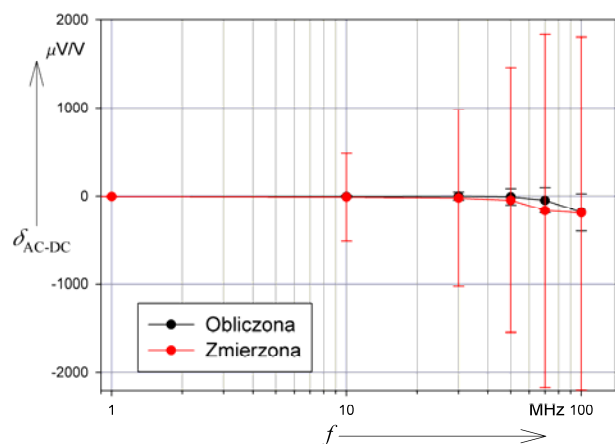
Rys.3. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania różnicy transferowej TPWS

Wyznaczenie różnicy transferowej CTVC wymagało modernizacji dotychczasowego stanowiska pomiarowego, służącego do komparowania TPWS. Główną przyczyną modernizacji była zbyt niska maksymalna częstotliwość napięcia przemiennego syntezowanego przez kalibrator Fluke 5700A (1 MHz). W miejsce kalibratora zastosowano generator Siglent SSG5040X, którego maksymalna częstotliwość syntezowanego napięcia przemiennego wynosi 4 GHz.

Wartość różnicy transferowej CTVC opracowanego w KMEiA została zmierzona poprzez komparację z planarnym wielozłączowym przetwornikiem termicznym (PMJTC) o napięciu nominalnym 3 V, produkowanym przez NIST, a skalibrowanym w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) w Niemczech. Ponieważ stała czasowa przetwornika CTVC jest znacznie większa od stałych czasowych TPWS, stosowanych w KMEiA, standardowa procedura kalibracji

(AC/DC+/AC/DC-/AC) powyżej 1 MHz zastosowano procedurę transferu RF-AC. W procedurze tej napięcie RF o wysokiej częstotliwości jest porównywane nie z napięciem DC tylko z napięciem AC o stosunkowo niskiej częstotliwości (najczęściej 1 kHz). Przy tej częstotliwości wpływ zjawisk termoelektrycznych jest w większości przetworników najmniejszy, a różnica transferowa przetwornika jest zbliżona do zera.

Dzięki temu nie ma potrzeby podawania na wejście komparowanych przetworników napięć stałych o przeciwnej polaryzacji w celu zminimalizowania wpływu błędu rewersji. Procedura ta jest znacznie krótsza (AC/RF/AC), co zmniejsza jej wrażliwość na niestabilność amplitudy generatora RF i na zmiany parametrów środowiskowych w kabinie pomiarowej. Otrzymana charakterystyka różnicy transferowej w przedziale częstotliwości od 1 kHz do 100 MHz została porównana z charakterystyką otrzymaną na podstawie modelu matematycznego CTVC (rys. 4).



Rys.4. Charakterystyka różnicy transferowej otrzymana z komparacji laboratoryjnej oraz z modelu matematycznego przetwornika CTVC KMEiA

Zmierzona wartość różnicy transferowej maleje w paśmie częstotliwości 1 kHz – 100 MHz. Największy spadek różnicy transferowej obserwowany jest powyżej 50 MHz. Wartość zarówno zmierzonej, jak i obliczonej różnicy transferowej przy 100 MHz jest porównywalna z różnicą transferową CTVC, opracowanego w NRC w Kanadzie [5]. Obliczona wartość różnicy transferowej CTVC zawiera się w przedziale niepewności wartości zmierzonej w całym przedziale częstotliwości, co potwierdza poprawność modelu matematycznego.

Duża niepewność typu B komparacji, aco za tym następuje, złożona niepewność wyznaczenia różnicy transferowej przetwornika powyżej 1 MHz, zdeterminowana jest niepewnością kalibracji przetwornika w PTB. Niestety nie znaleziono ośrodka na świecie, który podjąłby się komercyjnej bądź niekomercyjnej kalibracji PMJTC z mniejszą niepewnością w paśmie częstotliwości od 1 do

100 MHz. W maju 2023 r. na spotkaniu EURAMET TC-EM SC LF w Brnie, dyskutowano możliwość włączenia CTVC, opracowanego w KMEiA, do planowanej w najbliższych latach komparacji CCEM. Umożliwiłoby to znacznie lepsze scharakteryzowanie różnicy transferowej tego przetwornika.

## Podsumowanie

Opracowane metody pomiaru i zbudowane stanowiska pomiarowe pozwoliły na wyznaczenie najważniejszych parametrów metrologicznych prototypowego CTVC. Ze względu na dużą stałą czasową tego przetwornika, pomiar ww. parametrów był utrudniony. Zmierzona wartość różnicy transferowej CTVC jest zbliżona do wartości tego parametru, wyznaczonego na podstawie opracowanego modelu matematycznego przetwornika. Duża niepewność typu B pomiaru powyżej 1 MHz zdeterminowana jest niepewnością kalibracji wzorca podróznego, którą wykonano w PTB.

## LITERATURA

- [1] F. Overney, A. Rufenacht, J. Braun, B. Jeanneret and P. Wright, "Characterization of Metrological Grade Analog-to-Digital Converters Using a Programmable Josephson Voltage Standard", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 7, pp. 2172-2177, 2011.
- [2] B. C. Waltrip et al., "AC Power Standard using a programmable Josephson voltage standard," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 4, pp. 1041–1048, 2009.
- [3] S. Bauer et al., "Josephson voltage standards as toolkit for Precision Metrological applications at PTB," *Measurement Science and Technology*, vol. 34, no. 3, p. 032001, 2022.
- [4] P. Durandetto, E. Monticone, D. Serazio, and A. Sosso, "Thermal performances of an improved package for cryocooled Josephson standards," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 9, no. 7, pp. 1264–1270, 2019.
- [5] P. S. Filipowski, R. F. Clark, and D. C. Paulusse, "Calorimetric Thermal Voltage Converter as a wideband calculable standard of AC-DC difference," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48, no. 2, pp. 387–390, 1999.
- [6] M. Grzenik and M. Kampik, "Przeгляд metod minimalizacji różnicy transferowej termicznych planarnych wielozłączowych przetworników wartości skutecznej w paśmie częstotliwości 10 kHz – 1 MHz", *Pomiary Automatyka Kontrola (PAK)*, vol. 58, pp. 1040-1043, 2012.
- [7] T. Lipe, J. Kinard, D. Novotny and J. Sims, "Advanced Thermal Sensors for Broadband AC Voltage Metrology", *NCSLI Measure*, vol. 9, no. 2, pp. 74-78, 2014.
- [8] K. Kubiczek, M. Kampik, and M. Grzenik, "Analysis of DC reversal error of the calorimetric thermal voltage converter," *Measurement*, vol. 168, p. 108439, 2021.
- [9] Fluke 792A Instruction Manual, Rev. 1, 11/92.
- [10] K. Kubiczek, M. Kampik, and M. Grzenik, "A novel temperature sensor for a calorimetric thermal converter," *Measurement*, vol. 201, p. 111686, 2022.