

WYZNACZENIE NIEZALEŻNEJ OD CZĘSTOTLIWOŚCI SKŁADOWEJ RÓŻNICY TRANSFEROWEJ TERMICZNYCH WZORCÓW NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

Michał GRZENIK¹, Marian KAMPIK²

1. Politechnika Śląska
tel.: 32 237-10-64 e-mail: michal.grzenik@polsl.pl
2. Politechnika Śląska
tel.: 32 237-12-41 e-mail: marian.kampik@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań pierwotnych i roboczych wzorców, utrzymywanych w Laboratorium Wzorców AC-DC Instytutu Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Celem badań było wyznaczenie wartości niezależnego od częstotliwości składnika różnicy transferowej tych wzorców. Z przeprowadzonych badań wynika, iż wartość tego parametru jest dla wszystkich zbadanych wzorców równa zero ze standardową niepewnością $0,5 \mu\text{V/V}$. Dla porównania zależna od częstotliwości składowa różnica transferowej wzorca pierwotnego o $U_N = 3 \text{ V}$ przy częstotliwości 1 MHz jest równa około $14,2 \mu\text{V/V}$ ze standardową niepewnością $1,5 \mu\text{V/V}$.

Słowa kluczowe: wzorce, wzorzec napięcia przemiennego, transfer AC-DC, termiczny przetwornik wartości skutecznej, wartość skuteczna.

1. WPROWADZENIE

Pomimo dynamicznego rozwoju technologii kwantowych wzorców napięcia przemiennego wciąż prowadzone są prace nad udoskonaleniem wzorców napięcia przemiennego, wykorzystujących termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS) [1, 2]. Jednym z powodów stosowania wzorców z TPWS (nazywanych również termicznymi wzorcami napięcia przemiennego) jest ich większa dokładność w zakresie wyższych częstotliwości ($>100 \text{ kHz}$). Jednym z najważniejszych parametrów metrologicznych tych wzorców jest różnica transferowa δ_U oraz jej niepewność $u(\delta_U)$ [3, 4]. Wartość δ_U jest zależna między innymi od częstotliwości napięcia sinusoidalnego, podanego na wejście wzorca.

W zakresie częstotliwości od około 100 Hz do około 10 kHz różnica transferowa ma w przybliżeniu stałą wartość. Jej dominującą składową w tym zakresie częstotliwości jest składowa niezależna od częstotliwości, która jest zdeterminowana zjawiskami termoelektrycznymi, występującymi w grzejniku TPWS, takimi jak zjawisko Peltiera oraz zjawisko Thomsona. W przypadku najlepszych TPWS wpływ tych zjawisk jest bardzo mały, a różnica transferowa jest rzędu $0,1 \mu\text{V/V}$.

Dla częstotliwości większych od około 10 kHz można przyjąć, iż różnica transferowa składa się z dwóch składowych: niezależnej oraz zależnej od częstotliwości. Na składową zależną od częstotliwości mają wpływ parametry resztkowe (indukcyjność, pojemność, rezystancja)

wszystkich elementów składowych TPWS. Ogólnie wartości tych parametrów zależą od częstotliwości.

2. GENEZA PRACY

W latach 2011-2014 w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki (IMEiA) Politechniki Śląskiej w Gliwicach opracowano, zbudowano i zdeterminowano parametry metrologiczne dwóch pierwotnych wzorców napięcia przemiennego, wykorzystujących jednozłączowe TPWS. Nominalne napięcia wejściowe U_N tych wzorców są równe 3 V oraz 5 V . Wartości różnic transferowych obu wzorców oraz ich niepewności standardowe zostały obliczone w paśmie częstotliwości od 10 kHz do 1 MHz na podstawie złożonego modelu matematycznego [2,4]. Parametrami wejściowymi tego modelu są wyłącznie stałe materiałowe oraz wymiary geometryczne wzorców. Opracowany model, obowiązujący w paśmie od 10 kHz do 1 MHz , uwzględnia wyłącznie zależny od częstotliwości składnik różnicy transferowej, zdeterminowany przede wszystkim parametrami resztkowymi rezystora szeregowego i grzejnika TPWS. Stworzenie modelu teoretycznego zjawisk zachodzących w grzejniku TPWS, które wywierają decydujący wpływ na wartość niezależnego od częstotliwości składnika różnicy transferowej jest trudne i zostało zrealizowane tylko dla niektórych konstrukcji TPWS [5]. Ponadto opracowane modele wymagały bardzo dobrej znajomości technologii wykonania i wymiarów geometrycznych modelowanych przetworników, co w przypadku TPWS produkowanych komercyjnie nie zawsze jest możliwe. Model matematyczny wzorców IMEiA zakłada, iż wartość niezależnego od częstotliwości składnika różnicy transferowej jest równa zero. Założenie to przyjęto z uwagi na zastosowanie we wzorcach IMEiA wyselekcjonowanych jednozłączowych TPWS o bardzo małym błędzie rewersji (poniżej $0,005\%$). Mała wartość tego błędu wskazuje na małą niezależną od częstotliwości składową różnicy transferowej, jednak mimo to konieczne jest sprawdzenie poprawności przyjętego założenia. Wobec wspomnianych wyżej trudności zdecydowano się na jego eksperymentalne (pomiarowe) wyznaczenie w zakresie częstotliwości od około 100 Hz do około 10 kHz . W celu zwalidowania otrzymanych wyników podjęto decyzję o zastosowaniu co najmniej dwóch metod pomiaru, w tym

kalibrację jednego ze wzorców w zagranicznym renomowanym laboratorium.

3. METODY POMIARU NIEZALEŻNEJ OD CZĘSTOTLIWOŚCI SKŁADOWEJ RÓŻNICY TRANSFEROWEJ WZORCÓW

Różnica transferowa TPWS mierzona jest najczęściej w układzie komparatora TPWS [6], z wykorzystaniem przetwornika o znanej wartości różnicy transferowej. Komparator wyznacza różnicę różnic transferowych pomiędzy badanym przetwornikiem (δ_x) a przetwornikiem wzorcowym (δ_{wz}). Różnica transferowa badanego TPWS obliczana jest z wzoru:

$$\delta_x = \delta_{wz} + \Delta\delta \quad (1)$$

gdzie: $\Delta\delta$ – różnica różnic transferowych, zmierzona za pomocą komparatora TPWS.

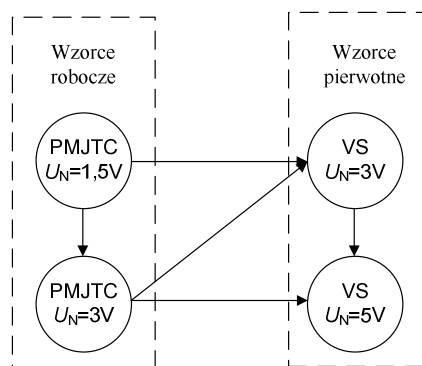
Bezpośredni pomiar różnicy transferowej TPWS jest możliwy dla częstotliwości poniżej 10 kHz, na przykład z wykorzystaniem metod FRDC (ang.: *Fast Reversed DC*) [7] lub przez bezpośredni pomiar napięć stałych i zmiennych, podanych na wejście badanego wzorca [8].

Metoda FRDC została opracowana w 1990 roku w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) w Niemczech oraz ETL w Japonii. Metoda ta wykorzystuje fakt, iż efekty termoelektryczne dla szybkich zmian polaryzacji napięcia stałego podawanego na grzejnik TPWS, o okresie znacznie krótszym niż stała czasowa przetwornika, nie wpływają na rozkład temperatury grzejnika. W metodzie tej, na przetwornik podawane są sekwencyjnie napięcia lub prądy stałe DC+, DC- oraz napięcie lub prąd o kształcie prostokątnym o określonej częstotliwości (tryb FRDC). Gdy źródło FRDC wytwarza napięcie stałe (tryb DC), to do składowej przyrostu temperatury grzejnika spowodowanej mocą Joule'a dodawana jest składowa wywołana kombinacją zjawisk Thomsona i Peltiera. Przyrost temperatury spowodowany tą składową zmienia znak po odwróceniu kierunku prądu przepływającego przez grzejnik, co powoduje zmianę rozkładu temperatury grzejnika. Przy odpowiednio dużej częstotliwości przełączania kierunku przepływu prądu łączny wpływ efektów Thomsona i Peltiera pierwszego rzędu jest uśredniony, a tym samym zanika wpływ efektu Thomsona drugiego rzędu. Dzięki temu przez porównanie wyników uzyskanych dla trybu DC i FRDC udział efektów termoelektrycznych można określić przez porównanie napięć wyjściowych TPWS, odpowiadających trybom DC i FRDC. Laboratorium IMEiA dysponuje własnym źródłem FRDC.

3. POMIAR NIEZALEŻNEJ OD CZĘSTOTLIWOŚCI SKŁADOWEJ RÓŻNICY TRANSFEROWEJ WZORCÓW

Niezależny od częstotliwości składnik różnicy transferowej wzorców został zmierzony dwoma metodami: z wykorzystaniem metody FRDC oraz przez porównanie ze wzorcem utrzymywanym w PTB. Z obawy przed uszkodzeniem podczas transportu wzorców IMEiA w pomiarach wykorzystano dwa znacznie bardziej odporne na uszkodzenia wzorce robocze, o nominalnych napięciach wyjściowych 1,5 V oraz 3 V. We wzorcach tych wykorzystano wielozłączowe planarne TPWS (ang. *Planar Multijunction Thermal Converter*, PMJTC) charakteryzujące

się wysoką czułością i zbliżoną do zera wartością niezależną od częstotliwości składowej różnicy transferowej. Wartość ich różnic transferowych została zmierzona za pomocą komparatora TPWS względem wzorców pierwotnych IMEiA. Komparacje wykonano w Laboratorium Wzorców AC-DC, którym dysponuje IMEiA. Przeprowadzone komparacje tworzą pewien zamknięty schemat przedstawiony na rys. 1. Schemat ten pozwala na sprawdzenie spójności przeprowadzonych pomiarów.



Rys. 1. Schemat komparacji wzorców (PMJTC - wzorce robocze, VS- wzorce pierwotne)

Pomiar różnicy transferowej wzorców roboczych został zrealizowany w trzech laboratoriach: w IMEiA, w Eidgenössisches Institut für Metrologie (METAS) w Szwajcarii oraz w PTB. Pomiar różnicy transferowej wzorca roboczego o $U_N = 3 V$ z wykorzystaniem metody FRDC został przeprowadzony w Laboratorium Wzorców AC-DC IMEiA oraz w METAS. Pomiar różnicy transferowej wzorca roboczego o $U_N = 1,5 V$ zlecono PTB. Zestawienie otrzymanych wyników zamieszczono w tablicy 1.

Tablica 1. Różnice transferowe wzorców roboczych, zmierzone w poszczególnych laboratoriach

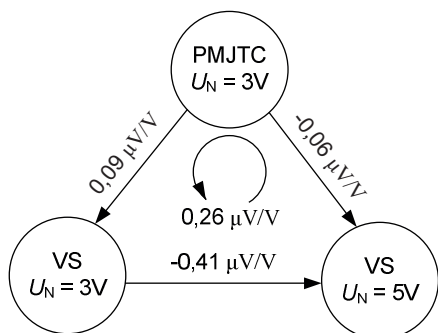
ośrodek	PMJTC $U_N = 3 V$		PMJTC $U_N = 3 V$		PMJTC $U_N = 1,5 V$	
	IMEiA	METAS	METAS	PTB	PTB	PTB
f	δ_U	$u(\delta_U)$	δ_U	$u(\delta_U)$	δ_U	$u(\delta_U)$
Hz	$\mu V/V$	$\mu V/V$	$\mu V/V$	$\mu V/V$	$\mu V/V$	$\mu V/V$
120	0,12	0,04	0,13	0,20	0,00	0,50
200	0,05	0,03	-0,07	0,30	0,00	0,50
300	-0,03	0,10	-0,10	0,10	0,00	0,50
400	-0,11	0,03	-0,15	0,10	0,00	0,50
500	-0,10	0,10	-0,19	0,20	0,00	0,50
1000	0,10	0,04	0,19	0,22	0,00	0,50
2000	0,06	0,05	0,10	0,19	0,00	0,50
5000	0,00	0,10	0,20	0,21	0,00	0,50
10000	-0,43	0,05	0,22	0,25	0,30	0,50

Bezpośrednie porównanie niektórych wyników przedstawionych w tablicy 1 jest utrudnione z uwagi na wykonanie pomiarów przy nieco różniących się częstotliwościach. Wprawdzie wartości różnic transferowych są do siebie zbliżone, ale mimo to zdecydowano się oszacować brakujące wartości różnic transferowych metodą interpolacji wyników pomiarów uzyskanych dla sąsiednich częstotliwości. Takie wartości zostały oznaczone w tablicy 1

kursują. Niepewność takiego oszacowania zwiększono w stosunku do pozostałych pomiarów. Pomimo tego, różnice pomiędzy zmierzonymi wartościami różnicy transferowej TPWS o $U_N = 3\text{ V}$ są mniejsze od niepewności pomiaru dla wszystkich częstotliwości z wyjątkiem 10 kHz. Zmierzone wartości różnicy transferowej obu przetworników biorących udział w badaniu są bardzo bliskie zeru. Standardowa niepewność wszystkich pomiarów była mniejsza od $0,5\ \mu\text{V/V}$.

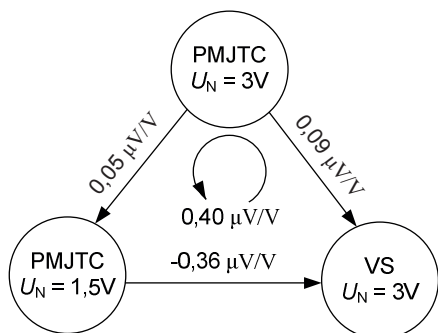
4. ANALIZA SPÓJNOŚCI OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Spójność zmierzonej różnicy transferowej w przeprowadzonych komparacjach sprawdzono tzw. metodą trójkątów. Przykładowy trójkąt pomiarowy przy częstotliwości 1 kHz dla trzech zbadanych wzorców (roboczego z PMJTC oraz obu wzorców pierwotnych IMEiA) przedstawiono na rys. 2. Niedomknięcie trójkąta wynosi $0,26\ \mu\text{V/V}$ i jest porównywalne ze standardową niepewnością pomiaru różnicy transferowej ($0,23\ \mu\text{V/V}$).



Rys. 2. Spójność pomiarowa wyników pomiaru niezależnej od częstotliwości różnicy transferowej przy częstotliwości 1 kHz (opis w tekście)

Niedomknięcie trójkąta przedstawionego na rys. 2 wzrasta wraz z częstotliwością i jest około dwukrotnie większe od niepewności pomiaru dla częstotliwości większych od 5 kHz. Przy 10 kHz niedomknięcie wynosi około $0,44\ \mu\text{V/V}$. Niedomknięcie trójkąta utworzonego z pozostałych przetworników (obu przetworników roboczych z PMJTC oraz wzorca pierwotnego IMEiA o $U_N = 3\text{ V}$) jest nieco większe (rys. 3).



Rys. 3. Spójność pomiarowa wyników pomiaru niezależnej od częstotliwości różnicy transferowej przy częstotliwości 1 kHz (opis w tekście)

5. WYZNACZENIE RÓŻNIC TRANSFEROWYCH BADANYCH WZORCÓW

Różnica transferowa pierwotnych wzorców IMEiA została wyznaczona z wykorzystaniem zamkniętego cyklu komparacji, przedstawionego na rys. 1. Zaletą tej metody jest możliwość weryfikacji poprawności zmierzonej różnicy transferowej. Każda ze zmierzonych różnic pomiędzy różnicami transferowymi dwóch przetworników może zostać wyznaczona na dwa sposoby: bezpośrednio lub z wykorzystaniem wyników pozostałych pomiarów.

Do obliczenia różnicy transferowej wzorców wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Dużą zaletą tej metody jest możliwość rozwiązania nadmiarowych, sprzecznych układów równań [9,10]. Umożliwia to wyznaczenie wartości różnic transferowych przetworników pomimo obecności niemożliwych do uniknięcia błędów pomiarowych oraz w przypadku niedomykania różnic transferowych występujących w trójkątach przedstawionych na rys. 2 oraz rys. 3. Jednak metoda ta wymaga znajomości różnicy transferowej co najmniej jednego wzorca, biorącego udział w komparacjach. W przypadku komparacji opisywanych w niniejszej pracy przyjęto dwie wartości odniesienia: różnicę transferową wzorca roboczego o $U_N = 3\text{ V}$, wyznaczoną z wykorzystaniem metody FRDC w METAS oraz wynik zleconej w PTB kalibracji wzorca roboczego o $U_N = 1,5\text{ V}$.

Obliczone różnice transferowe wszystkich zbadanych wzorców zamieszczono w tablicy 2. Bezwzględna wartość różnicy transferowej wszystkich przetworników biorących udział w badaniu jest mniejsza od $0,5\ \mu\text{V/V}$. Oszacowana standardowa niepewność pomiaru różnicy transferowej dla większości przetworników biorących udział w badaniu jest również bardzo mała i jest mniejsza od $0,5\ \mu\text{V/V}$. Wyjątkiem jest niepewność wzorca pierwotnego o $U_N = 5\text{ V}$, która jest nieco większa. Największa niepewność pomiaru występuje przy częstotliwości 120 Hz. Jest to prawdopodobnie spowodowane niedostatecznym uśrednianiem oscylacji temperatury grzejników przetworników jednozłączowych, występującym przy małych częstotliwościach prądu grzejnika.

Wartość bezwzględna różnicy transferowej TPWS wzrasta wraz z częstotliwością i przy częstotliwości 10 kHz ujawnia się wpływ zależnej od częstotliwości składowej różnicy transferowej. Zmierzona różnica transferowa badanych przetworników dla tej częstotliwości osiąga największą wartość spośród przebadanych częstotliwości.

Wyznaczone wartości różnic transferowych większości badanych wzorców nie zmieniały się w sposób monotoniczny ze zmianą częstotliwości, lecz oscylowały wokół $0\ \mu\text{V/V}$. Można zatem przyjąć iż wartość bezwzględna niezależnej od częstotliwości składowej różnicy transferowej zbudowanych wzorcowych przetworników jest równa $0,0 \pm 0,5\ \mu\text{V/V}$.

Tablica 2. Wyznaczona różnica transferowa TPWS biorących udział w komparacji

f	PMJTC $U_N = 1,5$ V		PMJTC $U_N = 3$ V		VS $U_N = 5$ V		VS $U_N = 3$ V	
	δ_U $\mu\text{V/V}$	$u(\delta_U)$ $\mu\text{V/V}$	δ_U $\mu\text{V/V}$	$u(\delta_U)$ $\mu\text{V/V}$	δ_U $\mu\text{V/V}$	$u(\delta_U)$ $\mu\text{V/V}$	δ_U $\mu\text{V/V}$	$u(\delta_U)$ $\mu\text{V/V}$
120	0,2	0,5	-0,1	0,4	-0,2	0,8	0,0	0,6
200	0,1	0,4	-0,1	0,4	0,1	0,6	0,2	0,5
300	0,0	0,4	-0,1	0,4	0,1	0,4	0,3	0,4
400	0,1	0,4	-0,2	0,4	0,3	0,5	0,0	0,4
500	0,0	0,3	-0,2	0,2	-0,1	0,4	0,0	0,3
1000	0,1	0,4	0,0	0,3	-0,5	0,5	0,0	0,4
2000	0,0	0,3	0,1	0,3	-0,2	0,4	-0,3	0,3
5000	0,0	0,3	0,2	0,2	-0,3	0,4	0,1	0,3
10000	0,2	0,4	0,3	0,3	-0,5	0,5	-0,1	0,4

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań pierwotnych i roboczych termicznych wzorców napięcia przemiennego, utrzymywanych w Laboratorium Wzorców AC-DC Instytutu Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Celem badań było wyznaczenie wartości niezależnego od częstotliwości składnika różnicy transferowej tych wzorców. Z przeprowadzonych badań wynika, iż wartość tego parametru wszystkich zbadanych wzorców jest równa zeru ze standardową niepewnością $0,5 \mu\text{V/V}$. Dla porównania zależna od częstotliwości składowa różnicy transferowej wzorca pierwotnego o $U_N = 3$ V przy częstotliwości 1 MHz jest równa około $14,0 \mu\text{V/V}$ ze standardową niepewnością $1,5 \mu\text{V/V}$ [2, 11].

7. BIBLIOGRAFIA

- Lipe T.: "A New Generation of Multijunction Thermal Current Converters", Digest of CPEM 2016, pp. 1 - 5.
- Grzenik M, Kampik M.: "Calculable AC Voltage Standards for 10 kHz-1 MHz Frequency Range", IEEE Trans. Instrum. Meas., IEEE early access articles, 2017, DOI: 10.1109/TIM.2016.2613404.
- Kampik M.: "Thermal converter with piezoacoustic sensor for AC-DC transfer", Gnome Books. Katowice 2000.
- Grzenik M.: "Wzorcowy termiczny przetwornik wartości skutecznej napięcia przemiennego", rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2015.
- Bubanja V., Early M. D., Sasaki H.: "Characteristics of single junction thermal converters", Digest of CPEM 2000, pp. 228 - 229.
- Kampik M.: „Stanowisko do wzorcowania termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego,” Przegląd Elektrotechniczny, vol. 86, no. 1, pp. 239–244, 2010.
- Klonz M., Hammond G., Inglis B. D., Sasaki H., Spiegel T., Stojanovic B., Takahashi K., Zirpel R.: "Measuring thermoelectric effects in thermal converters with a fast reversed dc," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, no. 2, pp. 379–382, 1995.
- Kampik M.: Cyfrowe źródła napięcia przemiennego o małej częstotliwości, monografia nr 224, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
- Klonz M., Laiz H.: New ac-dc transfer step-up calibration and uncertainty calculation in PTB and INTL, "Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2000" 2000, pp. 490 – 491.
- Cox M. G.: "The evaluation of key comparison data," Metrologia, vol. 39, Sep. 2002, pp. 589–595.
- Kampik M., Grzenik M, Lippert T., Trinchera B.: "Comparison of a Planar Thin-Film Thermal AC Voltage Standard up to 1 MHz", IEEE Trans. Instrum. Meas., IEEE early access articles, 2017, DOI: 10.1109/TIM.2017.2652238.

DETERMINATION OF FREQUENCY-INDEPENDENT AC-DC TRANSFER DIFFERENCE OF THERMAL AC VOLTAGE STANDARDS

The paper presents results of investigations of thermal AC voltage standards developed and maintained in the Laboratory of AC-DC Standards at the Institute of Measurement Science, Electronics and Control of Silesian University of Technology, Gliwice, Poland. The goal of these investigations was determination of the frequency-independent component of the AC-DC transfer difference of the four thermal AC voltage standards. Two of them were primary standards using selected single-junction thermal converters (SJTCs) and the other two were working standards using planar multijunction thermal converters (PMJTCs). The frequency-independent component of the AC-DC transfer difference was determined with a few methods including the measurement with the fast-reversed source (FRDC) maintained at the Swiss national metrology institute METAS and calibration in the German national metrology institute PTB. The analysis of obtained results, performed using the minimum squares method shows, that the frequency-independent component of the AC-DC transfer difference of the all four thermal AC voltage standards is equal to zero with standard uncertainty $0.5 \mu\text{V/V}$.

Keywords: standards, AC voltage standard, AC-DC transfer, thermal voltage converter.