

## Badania stabilności czasowej różnicy transferowej termicznych przetworników wartości skutecznej

**Streszczenie.** W roku 2014 przeprowadzono interkomparację zestawu termicznych przetworników wartości skutecznej (TPWS), utrzymywanych w Laboratorium Wzorców AC-DC na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. W 2022 roku przeprowadzono ponowną interkomparację powyższych wzorców oraz dokonano porównawczej analizy uzyskanych wyników. Analiza pozwoliła na sprawdzenie stabilności czasowej różnicy transferowych poszczególnych TPWS oraz sprawdzenie spójności pomiarowej.

**Abstract** In 2014 an intercomparison of set of Thermal Voltage Standards (TVC) maintained at Silesian University of Technology was performed. In 2022 the similar intercomparison of the same set of TVCs was performed. Also an analysis of results of both intercomparison was performed. It allowed to verified time stability of ac–dc transfer difference of all checked TVCs and checking consistency of comparator. (**Investigations of time stability of the ac-dc transfer difference of thermal voltage converters**)

**Słowa kluczowe:** wzorce napięcia przemiennego, dryft czasowy, różnica transferowa AC-DC, termiczny przetwornik wartości skutecznej.  
**Keywords:** ac voltage standards, time drift, ac-dc transfer difference, thermal voltage converter.

### Wstęp

W szerokopasmowych pierwotnych wzorcach napięcia przemiennego wykorzystuje się termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS), przy pomocy których realizowany jest transfer AC-DC, bazujący na metodzie podstawienia znanej wartości napięcia stałego. Podstawowym parametrem charakteryzującym dokładność TPWS jest jego różnica transferowa, wyznaczana - w przypadku przetworników pełniących rolę wzorców pierwotnych - na podstawie modelu matematycznego, w którym danymi wejściowymi są stałe materiałowe oraz wymiary geometryczne TPWS. Różnice transferowe przetworników znajdujących się niżej w hierarchii wzorców wyznacza się przez porównanie z przetwornikiem wzorcowym o uprzednio zdeterminowanej różnicy transferowej. Jest to realizowane przy wykorzystaniu zautomatyzowanego systemu pomiarowego (komparatora) [1]. Różnica transferowa  $\delta_x$  wzorcowanego przetwornika jest wyznaczana ze wzoru:

$$(1) \quad \delta_x = \delta_{\text{ref}} - \delta_{\text{komp}},$$

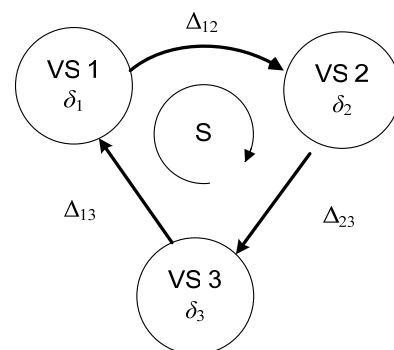
gdzie  $\delta_{\text{ref}}$  jest różnicą transferową przetwornika wzorcowego, a  $\delta_{\text{komp}}$  jest wynikiem komparacji.

Analiza wyników komparacji TPWS, przeprowadzonych w określonym odstępie czasu, pozwala na zbadanie stabilności czasowej różnic transferowych porównywanych przetworników. Wyniki takich badań są zaprezentowane w niniejszym artykule.

### Metodyka badań

Różnice transferowe wzorców o znamionowych napięciach wejściowych wyższych od kilku woltów z reguły wyznacza się względem wzorców pierwotnych przez porównanie ze sobą poszczególnych TPWS. Ponieważ zakres napięcia wejściowego przetworników termicznych zawiera się w przedziale od około  $0,3U_N$  do  $U_N$ , schemat komparacji bywa z reguły dość złożony. Występujące w nim wzajemne porównania od kilku do kilkunastu TPWS o wzrastających znamionowych napięciach wejściowych nazywane jest procedurą step-up [2]. Z reguły wykonuje się pewną liczbę nadmiarowych komparacji, które nie są niezbędne do przeprowadzenia procedury step-up. Dzięki temu możliwe jest porównanie wyników nadmiarowych ścieżek komparacji, a przez to zweryfikowanie poprawności metody pomiaru oraz sprawdzenie jej spójności. Służą temu

diagramy w postaci trójkątów, w których wierzchołkach umieszcza się wyznaczone wartości różnic transferowych  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  porównywanych wzorców VS1, VS2 oraz VS3, a przy jego bokach - różnice  $\Delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ ,  $\Delta_{23} = \delta_2 - \delta_3$ ,  $\Delta_{31} = \delta_3 - \delta_1$  pomiędzy nimi wyznaczone przez bezpośrednie porównanie obu wzorców. Te ostatnie są wynikami bezpośredniego porównania wzorców ze sobą. Przykładowy diagram tego rodzaju przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat komparacji umożliwiający sprawdzenie spójności

Przy braku jakichkolwiek błędów suma wszystkich różnic wartości różnic transferowych w tak utworzonym trójkącie powinna wynosić zero:

$$(2) \quad S = \Delta_{12} + \Delta_{23} + \Delta_{31} = 0.$$

Suma ta, umieszczona wewnątrz trójkąta przedstawionego na rysunku 1, reprezentuje niespójność pomiaru. Jej wartość powinna być możliwie bliska zeru. Wartość różna od zera wskazuje na występowanie błędu systematycznego lub nadmiernego. Największe wartości niespójności są obserwowane przy wyższych częstotliwościach, przy których dominuje wpływ pojemności pasywnych między grzejnikami a czujnikami temperatury TPWS, oraz przy komparacji przetworników o najwyższym nominalnym napięciu wejściowym, kiedy ujawnia się wpływ nagrzewania TPWS. Ponadto przy komparacji przetworników o nominalnym napięciu wejściowym mniejszym od 5 V, zwłaszcza różniących się konstrukcją (TPWS jednozłączowy, wielozłączowy)

niepójność pomiarowa osiąga wartości większe od  $1 \mu\text{V/V}$ . Związane jest to ze znacznymi różnicami pomiędzy wartościami parametrów resztkowych obwodów grzejnik – termopara TPWS [6].

### Opis i wyniki komparacji przeprowadzonej w 2014 roku

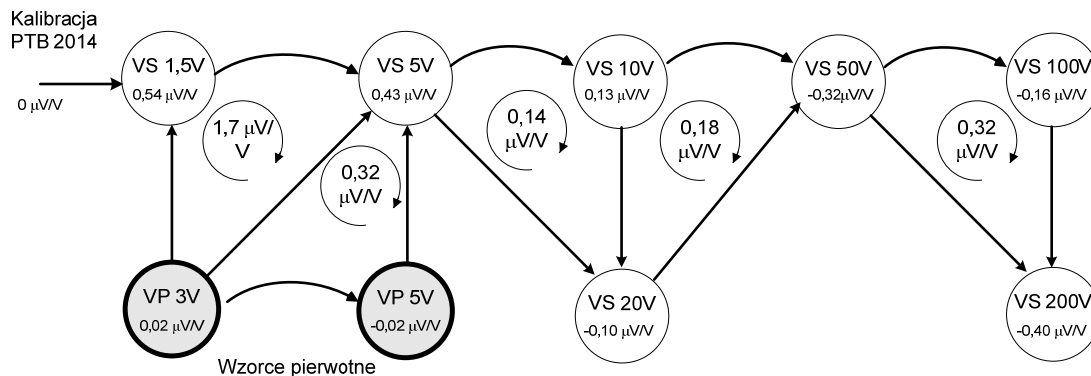
W 2014 roku przeprowadzono kompleksową komparację TPWS utrzymywanych w Laboratorium Wzorców AC-DC na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Jej efektem było wyznaczenie różnic transferowych komparowanych przetworników w oparciu o dwa wzorce pierwotne (oznaczenie VP) o nominalnym napięciu wejściowym  $U_N=3\text{ V}$  i  $U_N=5\text{ V}$ . Różnice transferowe tych wzorców zostały zdeterminowane kilkoma metodami w paśmie częstotliwości  $10\text{ Hz} - 30\text{ MHz}$ , przy czym w paśmie  $10\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$  parametry te obliczono na podstawie modelu matematycznego [3]. Wartości wyznaczonych różnic transferowych wzorców pierwotnych zostały zweryfikowane przez:

a) ich wzajemną komparację,

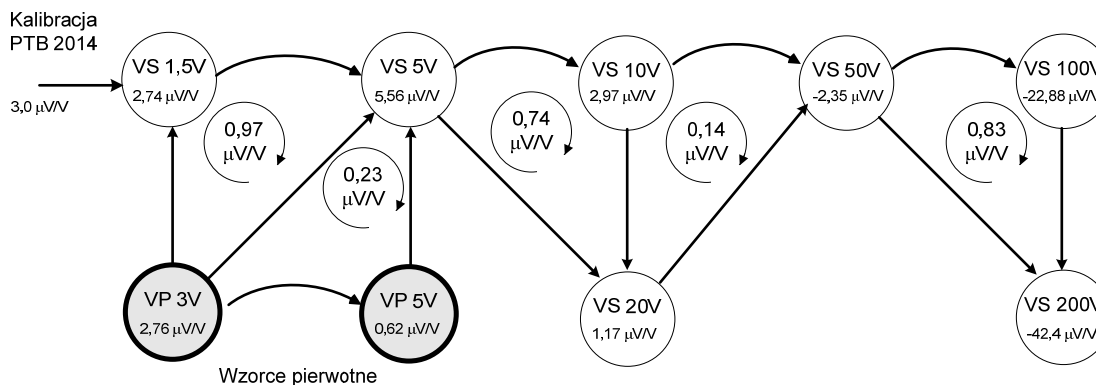
b) komparację z wielozłączowym TPWS o  $U_N=1,5\text{ V}$  poddanym w 2014 r. kalibracji w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) w Braunschweigu (Niemcy),

c) porównanie międzylaboratoryjne o zasięgu międzynarodowym, przeprowadzone w 2016 r. pomiędzy Politechniką Śląską, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) w Turynie (Włochy) oraz instytut desygnowany TRESKAL w Silkeborgu (Dania) [4].

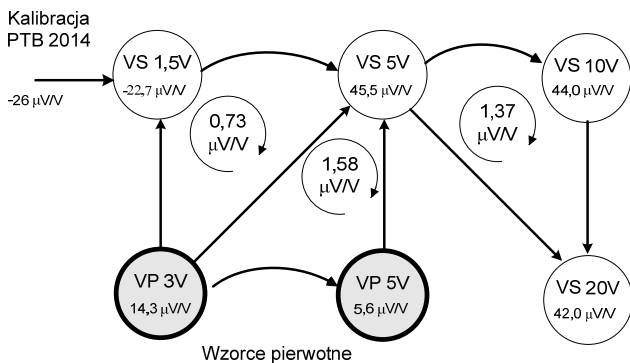
Wartości różnic transferowych pozostałych wzorców (oznaczenie VS), utrzymywanych w Laboratorium Wzorców AC-DC, wyznaczono względem wzorców pierwotnych poprzez odpowiednie skomparowanie ze sobą poszczególnych TPWS o zwiększającym się nominalnym napięciu wejściowym aż do napięcia  $200\text{ V}$ . Zastosowany schemat komparacji wraz z wynikami pomiarów i wartościami różnic transferowych wyznaczonych przy częstotliwościach  $1\text{ kHz}$ ,  $100\text{ kHz}$  oraz  $1\text{ MHz}$  przedstawiono na rysunkach 2 - 4. Na rysunkach tych występuje wielozłączowy TPWS o  $U_N=1,5\text{ V}$ , poddany kalibracji w PTB. Ograniczenie napięcia do  $22\text{ V}$  przy częstotliwości  $1\text{ MHz}$  wynika z właściwości zastosowanego w komparatorze źródła napięcia przemiennego [5].



Rys.2. Schemat komparacji przeprowadzonej w 2014 z zmierzonymi wartościami różnicy transferowej przy 1 kHz



Rys.3. Schemat komparacji przeprowadzonej w 2014 z zmierzonymi wartościami różnicy transferowej przy 100 kHz



Rys.4. Schemat komparacji przeprowadzonej w 2014 z zmierzonymi wartościami różnicy transferowej przy 1 MHz

Składowa niepewności wyznaczenia różnicy transferowej, związana z systemem pomiarowym nie przekracza  $1 \mu\text{V/V}$ . Niepewność oszacowania różnicy transferowej wzorca pierwotnego jest tego samego rzędu przy  $1\text{ kHz}$ , zwiększając się wraz z częstotliwością do około  $1,5 \mu\text{V/V}$  przy  $1\text{ MHz}$ .

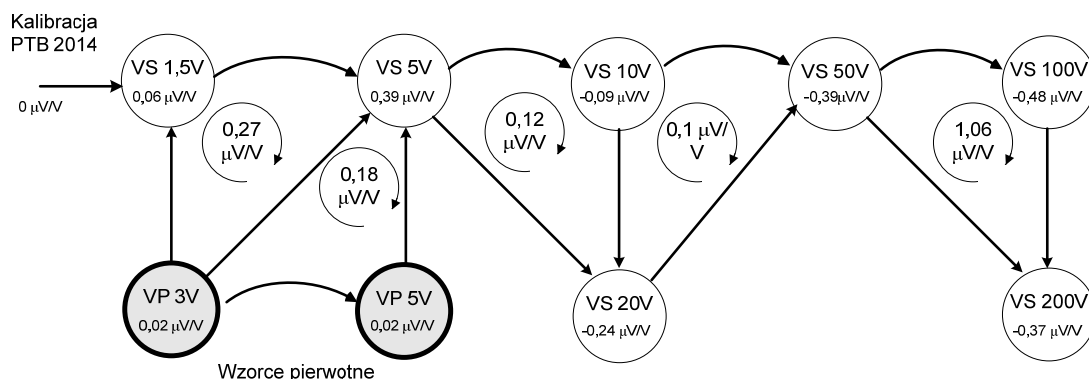
Podczas badań wykonano pewną liczbę wspomnianych wcześniej nadmiarowych komparacji, m.in. różnica transferowa TPWS o  $U_N=20\text{ V}$  została wyznaczona przez komparację ze wzorcem o  $U_N=5\text{ V}$  oraz przez dwie dodatkowe komparacje z przetwornikiem o  $U_N=10\text{ V}$  (rys. 4).

## Opis i wyniki komparacji przeprowadzonej w 2022 roku

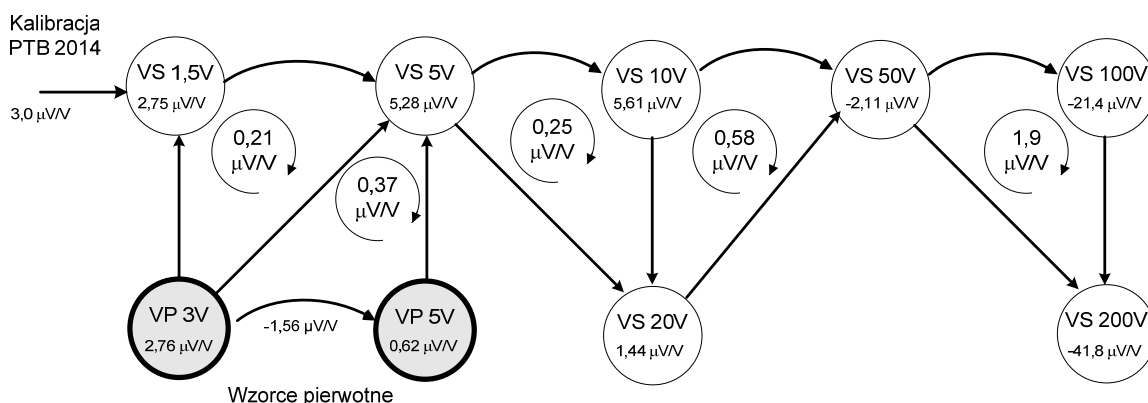
W 2022 roku zdecydowano się na przeprowadzenie ponownego porównania wzorców celem zbadania stabilności czasowej ich różnic transferowych, wykrycia uszkodzonych TPWS oraz zbadania stabilności komparatora przetworników. Dodatkową motywacją do wykonania badań było pokrywanie się warstwą tlenków obudów wzorców pierwotnych. Obawiano się, iż związana z tym zjawiskiem zmiana rezystancji powierzchni obudowy wzorców może wywierać niekorzystny wpływ na wartość ich różnicy transferowej. Na wstępie porównano wzorec pierwotny o  $U_N=3\text{ V}$  z wielozłączowym przetwornikiem o  $U_N=1,5\text{ V}$ , skalibrowanym w 2014 r. w PTB. Wynik tego porównania nie wykazał istotnej zmiany różnicy różnic transferowych komparowanych przetworników w stosunku do wyników uzyskanych w 2014 r.

Następnie - podobnie jak w 2014 r. - wykonano procedurę step-up dla pozostałych TPWS aż do napięcia 200 V. Na jej podstawie wyznaczono różnice transferowe komparowanych przetworników względem dwóch wzorców pierwotnych o  $U_N=3\text{ V}$  oraz  $U_N=5\text{ V}$ . Wyznaczone wartości różnic transferowych dla wybranych częstotliwości przedstawiono na rysunkach od 5 do 7.

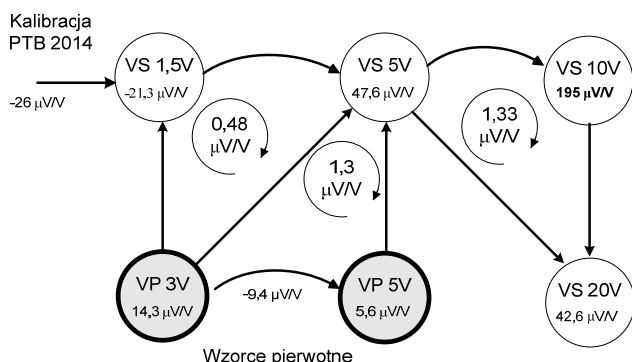
Podobnie jak w 2014 r. wykonano pewną liczbę nadmiarowych komparacji, których wyniki wykorzystano do oceny spójności pomiarowej komparowanych wzorców jak i samego komparatora. Nie wykryto istotnej niespójności związanej z systemem pomiarowym. Podobnie jak w przypadku komparacji w 2014 największe niespójności pojawiały się dla najwyższych napięć.



Rys.5. Schemat komparacji przeprowadzonej w 2022 z zmierzonymi wartościami różnicy transferowej przy 1 kHz



Rys.6. Schemat komparacji przeprowadzonej w 2022 z zmierzonymi wartościami różnicy transferowej przy 100 kHz



Rys.7. Schemat komparacji przeprowadzonej w 2022 z zmierzonymi wartościami różnicy transferowej przy 1 MHz

## Stabilność czasowa różnicy transferowej TPWS

W tabelach od 1 do 3 przedstawiono zmierzone wartości różnic transferowych oraz ich oszacowaną zmianę czasową przy częstotliwości 1 kHz, 100 kHz oraz 1 MHz. Przy 1 kHz

wyznaczone różnice były mniejsze niż 1  $\mu\text{V/V}$ . Ogólnie drift czasowy większości zbadanych przetworników jest mniejszy od niepewności pomiaru lub ma porównywalną wartość. Jedynie w przypadku wielozłączowego TPWS o  $U_N=10\text{ V}$  wykryto zmianę różnicy transferowej o około -4  $\mu\text{V/V}$  przy 100 kHz i o około -150  $\mu\text{V/V}$  przy 1 MHz, co wskazuje na możliwe uszkodzenie tego wzorca.

Tabela 1. Oszacowany drift różnicy transferowej przy 1 kHz

Oznaczenie wzorca	$\Delta\delta_{ij}$	$u(\delta_{ij})$
VP 3V	-0,1	0,7
VP 5V	0,1	0,7
VS 1,5V	0,3	0,8
VS 5V	-0,1	0,7
VS 10V	0,1	0,9
VS 20V	0,0	0,9
VS 50V	-0,1	1,0
VS 100V	0,4	1,1
VS 200V	-0,1	1,0

Tabela 2. Oszacowany dryft różnicy transferowej przy 100 kHz

Oznaczenie wzorca	$\Delta\delta_U$	$u(\delta_U)$
VP 3V	-0,2	0,6
VP 5V	0,2	0,6
VS 1,5V	-0,8	0,7
VS 5V	-0,6	0,6
VS 10V	<b>-3,6</b>	<b>0,7</b>
VS 20V	-1,1	0,7
VS 50V	-1,5	0,8
VS 100V	-1,7	0,9
VS 200V	-0,6	1,2

Tabela 3. Oszacowany dryft różnicy transferowej przy 1 MHz

Oznaczenie wzorca	$\Delta\delta_U$	$u(\delta_U)$
VP 3V	-0,4	1,2
VP 5V	0,4	1,0
VS 1,5V	-1,3	1,3
VS 5V	-1,0	1,2
VS 10V	<b>-151,0</b>	<b>1,3</b>
VS 20V	-0,7	1,3

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki komparacji termicznych przetworników wartości skutecznej utrzymywanych w Laboratorium Wzorców AC-DC na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej przeprowadzonych w 2014 oraz 2022 r. Przeprowadzone badania potwierdziły brak znaczącej zmiany różnicy transferowej większości posiadanych przetworników. Wykryte zostało prawdopodobne uszkodzenie wzorca o  $U_N=10\text{ V}$ , na co wskazuje duża zmiana wartości jego różnicy transferowej przy częstotliwości 100 kHz oraz 1 MHz od czasu ostatniej komparacji. Na podstawie zebranych doświadczeń i mając na względzie, że przy 1 kHz nie zaobserwowano zmiany wartości różnicy

transferowej, najbardziej prawdopodobna jest zmiana parametrów gniazda wejściowego tego wzorca. Będzie to przedmiotem dalszych badań. Wcześniejsze obawy o wpływ efektu starzenia obudowy obu wzorców pierwotnych na ich różnicę transferową nie potwierdziły się.

**Autorzy:** dr inż. Michał Grzenik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: [michal.grzenik@polsl.pl](mailto:michal.grzenik@polsl.pl), prof. dr hab. inż. Marian Kampik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: [marian.kampik@polsl.pl](mailto:marian.kampik@polsl.pl)

### LITERATURA

- [1] Kampik, M., Stanowisko do wzorcowania termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86, 1/2010
- [2] Klonz M., Laiz H.: New ac-dc transfer step-up calibration and uncertainty calculation in PTB and INTL., "Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2000 Conference on" 2000, pp. 490 – 491
- [3] Grzenik, M.; Kampik, M., Calculable AC voltage standards for 10 kHz-1 MHz frequency range, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.: 66, Issue: 6, 2017
- [4] Kampik, M.; Grzenik, M.; Lippert, T., Trinchera, B., Comparison of a Planar thin-film thermal AC voltage standard up to 1 MHz, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.: 66, Issue: 6, 2017
- [5] The 5700A/5720A Series II High Performance Multifunction Calibrators - Extended Specifications. Fluke Calibration pub. ID 10800-eng, rev. 04
- [6] Filipowski P.S., Boecker M., Experience with high-output-resistance MJTC AC-DC transfer standards at high frequencies [multijunction thermal converters], *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.: 52, Issue: 4, August 2003, p. 1314 – 1319