

Bilateralne porównanie termicznych wzorców napięcia przemiennego

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki bilateralnego porównania termicznych przetworników wartości skutecznej o napięciu wejściowym 2 V i 3 V, wchodzących w skład polskiego państwowego wzorca napięcia elektrycznego przemiennego, utrzymywanego w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie, z pierwotnym wzorcem napięcia przemiennego o napięciu wejściowym 3 V, opracowanym i utrzymywanym w Laboratorium Wzorców AC-DC Katedry Metrologii, Elektroniki i Automatyki (KMEiA) na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

Abstract. The article presents the results of bilateral comparison of thermal converters of nominal input voltages equal 2 V and 3 V from the set of Polish AC voltage standards, maintained in the Central Office of Measures in Warsaw, with the primary AC voltage 3 V standard developed and maintained at the AC-DC Transfer Laboratory of the Department of Measurement Science, Electronics and Control at the Faculty of Electrical Engineering of the Silesian University of Technology in Gliwice. (**Bilateral comparison of thermal ac voltage standards**)

Słowa kluczowe: wzorce napięcia przemiennego, transfer AC-DC, porównania międzylaboratoryjne, termiczne przetworniki napięcia przemiennego.

Keywords: AC voltage standards, AC-DC transfer, interlaboratory comparisons, thermal voltage converters

Wstęp

Porównania wzorców, utrzymywanych w różnych laboratoriach, pozwalają, między innymi, na wykrycie ich błędów systematycznych. W 2018 roku dokonano w Laboratorium Wzorców AC-DC Katedry Metrologii, Elektroniki i Automatyki (KMEiA) na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach porównania termicznego przetwornika wartości skutecznej (TPWS) o nominalnym napięciu wejściowym 2 V, wchodzącego w skład państwowego wzorca jednostki miary napięcia elektrycznego przemiennego, utrzymywanego w Głównym Urzędzie Miar (GUM) w Warszawie z pierwotnym wzorcem o nominalnym napięciu wejściowym 3 V, zbudowanym i utrzymywanym w KMEiA.

Jednym z celów przedstawionego w niniejszym artykule porównania było sprawdzenie możliwości wyeliminowania konieczności sprawdzania polskiego państwowego wzorca jednostki miary napięcia elektrycznego przemiennego w zagranicznym narodowym instytucie metrologicznym (ang. *National Measurement Institute*, NMI). Byłoby to możliwe, gdyby opracowany w KMEiA wzorec pierwotny został uznany za wzorec państwowy, który byłby nadzorowany i utrzymywany przez GUM we współpracy z Wydziałem Elektrycznym Politechniki Śląskiej lub gdyby Laboratorium Wzorców AC-DC KMEiA uzyskało status Instytucji Desygnowanej (ang. *Designated Institution*, DI).

Wzorec utrzymywany w GUM

W skład państwowego wzorca napięcia elektrycznego przemiennego, utrzymywanego w GUM, wchodzi między innymi komercyjny zestaw termicznych przetworników wartości skutecznej (TPWS) Holt Model 11 (Rys. 1). Zestaw ten składa się z zestawu trzech jednozłączowych TPWS o różnych nominalnych prądach wejściowych (2,5 mA; 5 mA i 10 mA) oraz szeregu rezystorów szeregowych (zakresowych), umożliwiających rozszerzenie nominalnego napięcia wejściowego przetworników od około 0,5 V do 1000 V oraz w paśmie częstotliwości od 10 Hz do 1 MHz.

W odróżnieniu od wzorca pierwotnego KMEiA, wzorce Holt Model 11 nie są wzorcami licznymi i wymagają cyklicznej kalibracji względem wzorca stojącego wyżej w hierarchii i utrzymywanego przez NMI lub instytucję desygnowaną. Ostatnia kalibracja wzorca Holt Model 11, utrzymywanego w GUM, została przeprowadzona w



Rys. 1. Zestaw wzorców Holt 11, utrzymywany w GUM

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) w Braunschweigu (Niemcy) pod koniec 2016 roku. Ze względu na duży koszt kalibracji jest ona przeprowadzana w dość długich, kilkuletnich odstępach czasowych.

Wzorec utrzymywany w Laboratorium Wzorców AC-DC KMEiA

W skład wzorca napięcia przemiennego opracowanego, zbudowanego i utrzymywanego w Laboratorium Wzorców AC-DC KMEiA wchodzi zestaw wielozłączowych TPWS różnych producentów oraz dołączanych do ich wejścia rezystorów zakresowych, wykonanych we własnym zakresie. Zestaw ten umożliwia realizację napięciowego transferu AC-DC dla napięć z przedziału od około 0,2 V do 1000 V oraz w paśmie częstotliwości od 10 Hz do 30 MHz. Wzorce te są kalibrowane przy wykorzystaniu dwóch licznymi wzorców pierwotnych KMEiA o nominalnych napięciach wejściowych $U_N = 3\text{ V}$ oraz 5 V (Rys. 2). W wzorcach tych zastosowano wyselekcjonowane jednozłączowe TPWS o rezystancji grzejnika równej $90\ \Omega$. Przetworniki te zostały umieszczone wspólnie w miedzianej obudowie razem z rezystorami szeregowymi, ograniczającymi wartość prądu grzejnika TPWS oraz zwiększającymi wartość nominalnego napięcia wejściowego. Rezystory szeregowy są wykonane z cienkiego drutu oporowego o małym temperaturowym



Rys. 2. Wzorce 3 V oraz 5 V o licznej różnicy transferowej opracowane, zbudowane i utrzymywane w KMEiA

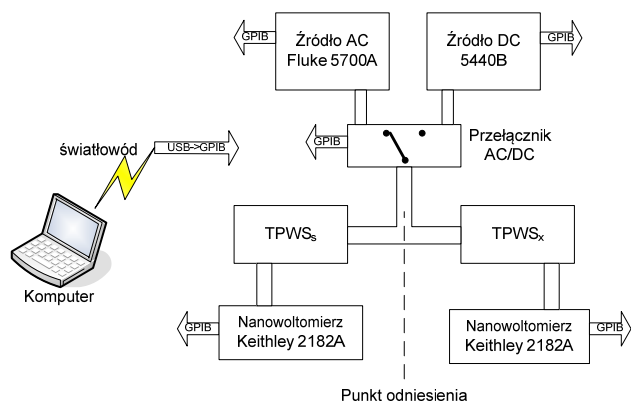
współczynnika rezystancji. Różnica transferowa obu wzorców pierwotnych została obliczona w paśmie częstotliwości od 10 kHz do 30 MHz na podstawie złożonego modelu matematycznego [1], [2].

Poprawność obliczonych różnic transferowych została zweryfikowana na kilka sposobów, w tym przez porównanie z wzorcami pierwotnymi Włoch, Danii oraz Szwecji [3], [4]. W paśmie częstotliwości od 10 Hz do około 40 Hz różnice transferowe wzorców KMEiA wyznaczono metodą opisaną w [6]. Niezależną od częstotliwości składową różnicę transferową wyznaczono przy wykorzystaniu metody FRDC [9], [8]. Wszystkie wzorce KMEiA są wyposażone w popularne wejściowe gniazda koncentryczne typu N.

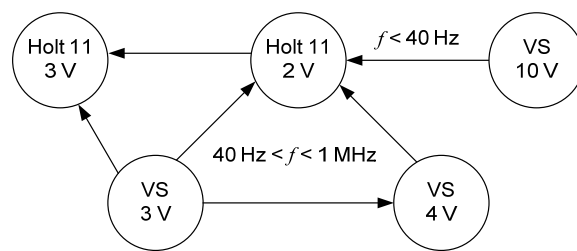
Porównanie wzorców należących do GUM i KMEiA

Porównania wzorca GUM o nominalnym napięciu wejściowym 2 V z wzorcem pierwotnym KMEiA o nominalnym napięciu wejściowym 3 V dokonano w Laboratorium Wzorców AC-DC KMEiA w pierwszej połowie 2018 roku.

Pomiary wykonano dla wybranych częstotliwości z przedziału od 10 Hz do 1 MHz przy pomocy zautomatyzowanego komparatora wzorców AC-DC, opracowanego w KMEiA (Rys. 3). Dla wzorców o odpowiednio dużej stabilności komparator umożliwia uzyskanie rozdzielczości pomiaru różnicy różnic transferowych komparowanych wzorców rzędu 100 nV/V.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego do pomiaru różnicy transferowej w KMEiA



Rys. 4. Schemat przeprowadzonych porównań

Sinusoidalne napięcie przemienne, podawane na komparowane wzorce, generowane jest przez kalibrator Fluke 5700A, natomiast napięcia stałe wytwarzane jest przez kalibrator Fluke 5440B.

Wybór źródła napięcia (AC lub DC), podawanego na przetworniki, dokonywany jest przy wykorzystaniu specjalnego przełącznika transferowego, opracowanego w KMEiA [5].

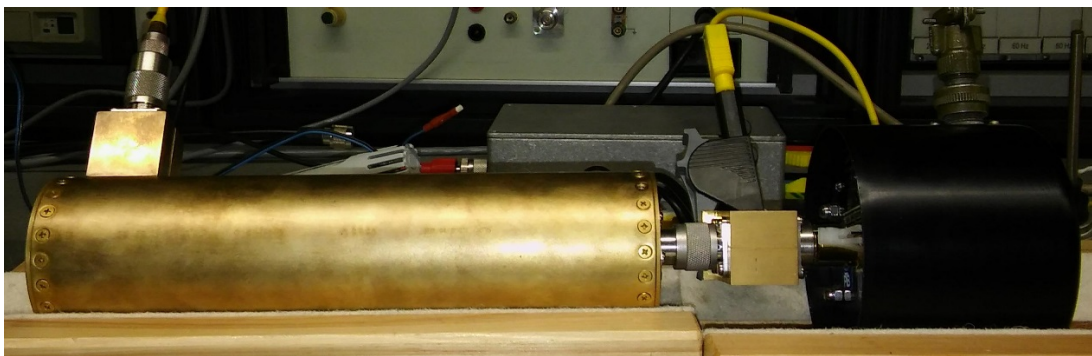
Napięcie wyjściowe porównywanych TPWS mierzone jest za pomocą dwóch nanowoltmierz Keithley 2182A. Przyrządy pomiarowe sterowane są za pomocą komputera poprzez optycznie izolowany interfejs GPIB.

W porównaniach zastosowano dodatkowy wzorec o nominalnym napięciu wejściowym 4 V, składający się z jednozłączowego TPWS z rezystorem szeregowym oraz należący do GUM wzorec o nominalnym napięciu wejściowym 3 V. W badaniach wykorzystano również, należący do KMEiA, wielozłączowy TWPS o nominalnym napięciu wejściowym $U_N = 10$ V, który pozwolił na wykonanie porównania z wzorcem GUM dla częstotliwości mniejszych od 40 Hz z wykorzystaniem metody obniżonej mocy [6].

Wykorzystanie dodatkowych wzorców o napięciu wejściowym 3 V oraz 4 V pozwoliło na zamknięcie cyklu komparacji i sprawdzenie spójności przeprowadzonych pomiarów. Schemat zrealizowanych porównań przedstawiono na Rys. 4. Na rys. 5 przedstawiono widok wzorca GUM o $U_N = 2$ V oraz wzorca KMEiA o $U_N = 3$ V podczas ich porównania.

Problemy związane z niekompatybilnością gniazd wejściowych

Przetworniki wchodzące w skład zestawu Holt 11 wyposażone są w złącza wejściowe typu GR-874, coraz rzadziej wykorzystywane w wzorcach napięcia przemiennego ze względu na trudność w zdefiniowaniu płaszczyzny odniesienia. Ze względu na różne rodzaje gniazd wejściowych, do połączenia wzorca GUM z wzorcami KMEiA wykorzystano specjalny trójnik/adapter, opracowany i skonstruowany w KMEiA. Trójnik ten posiada dwa gniazda typu N oraz jedno gniazdo typu GR-874 (Rys. 6). Do złącza GR-874 podłączony jest przetwornik należący do GUM, a do pozostałych dwóch złączy odpowiednio: wzorec należący do KMEiA oraz wyjście przełącznika transferowego. Trójnik ten został tak zaprojektowany, aby długość jego ramion, wykorzystanych do podłączenia obu TPWS, była maksymalnie zbliżona do długości ramion trójnika komercyjnego [7]. Ponadto starano się tak dobrać średnicę przewodu środkowego oraz grubość przerwy izolacyjnej pomiędzy przewodem środkowym a obudową wewnątrz trójnika, aby jego impedancja falowa wynosiła 50 Ω (impedancja falowa trójników komercyjnych oraz koncentrycznych przewodów połączeniowych wynosi również 50 Ω).



Rys. 5. Komparacja należącego do GUM wzorca o $U_N = 2\text{ V}$ z opracowanym w KMEiA wzorcem o liczałnej różnicy transferowej o $U_N = 3\text{ V}$

W komparacjach wykorzystano również dwa inne trójniki: trójnik wyposażony w 3 złącza N oraz trójnik wyposażony w 3 złącza GR-874, połączony z adapterem GR-874 na N służącym do połączenia z przełącznikiem transferowym.

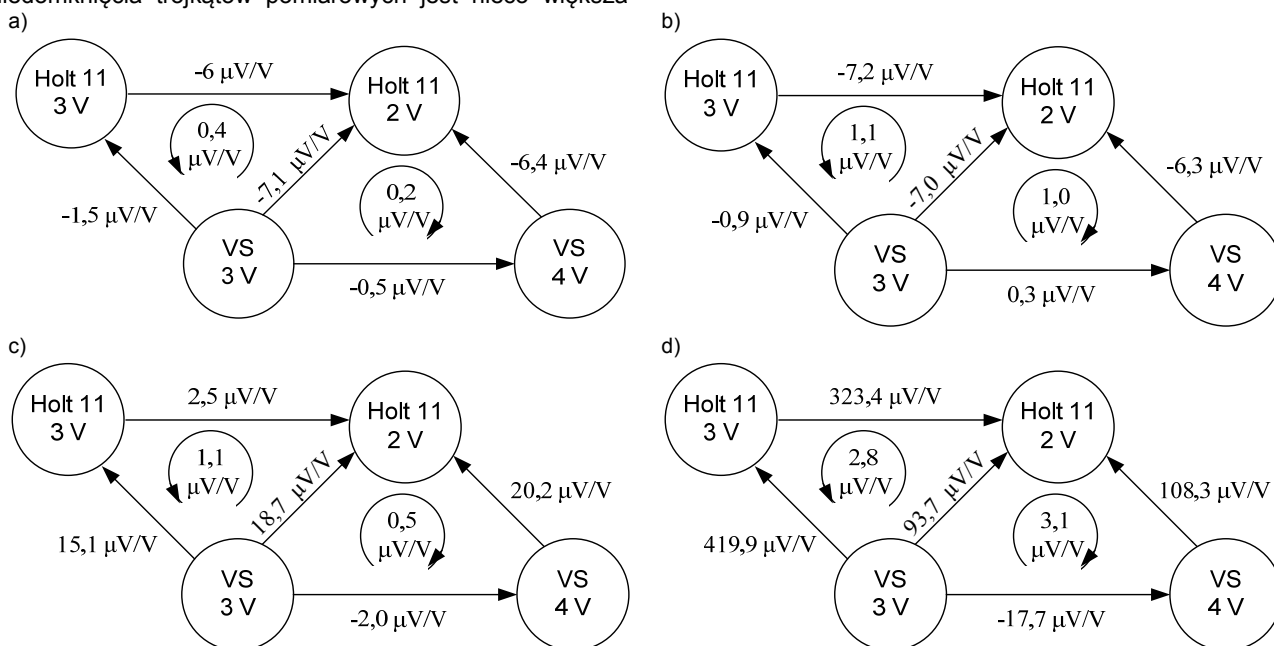
Sprawdzenie spójności przeprowadzonych pomiarów

W celu wykrycia ewentualnego błędu systematycznego wyniki komparacji, przeprowadzonych zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 4, sprawdzono pod kątem ich spójności. Przykładowe trójki pomiarowe, sporządzone na podstawie wyników pomiarów uzyskanych przy wybranych częstotliwościach przedstawiono na rys. 7. Można wyodrębnić na nim dwa trójki pomiarowe: prawy oraz lewy. Na przykład niedomknięcie prawego trójki pomiarowego, utworzonego z wzorca pierwotnego KMEiA (VS o $U_N = 3\text{ V}$), wzorca GUM (Holt 11 o $U_N = 2\text{ V}$) oraz dodatkowego wzorca KMEiA (VS o $U_N = 4\text{ V}$) dla częstotliwości 1 kHz (rys.7b) wynosi $1,0\text{ }\mu\text{V/V}$ i jest większe od standardowej niepewności pomiaru różnicy transferowej ($0,3\text{ }\mu\text{V/V}$). Natomiast niedomknięcie lewego trójki pomiarowego (rys.7b), utworzonego z wzorca pierwotnego KMEiA (VS o $U_N = 3\text{ V}$) oraz dwóch wzorców należących do GUM (Holt 11 o $U_N = 2\text{ V}$ oraz Holt 11 o $U_N = 3\text{ V}$) wynosi $1,1\text{ }\mu\text{V/V}$ i jest większe od standardowej niepewności pomiaru różnicy transferowej ($0,3\text{ }\mu\text{V/V}$), co sugeruje, iż niepewność ta może być niedoszacowana. Wartość niedomknięcia trójki pomiarowych jest nieco większa

dla trójki utworzonego z dwóch przetworników należących do GUM niż w drugim trójki pomiarowym, w którym znajdują się dwa przetworniki KMEiA. Ogólnie wartość niedomknięcia trójki pomiarowych dla częstotliwości z przedziału od 10 Hz do 500 kHz jest rzędu $1\text{ }\mu\text{V/V}$. Dla częstotliwości powyżej 500 kHz niedomknięcie wzrasta, osiągając wartość około $3\text{ }\mu\text{V/V}$ przy 1 MHz. Oszacowana standardowa niepewność pomiaru różnicy transferowych zależy od częstotliwości i zawiera się w przedziale od $0,3\text{ }\mu\text{V/V}$ do $1\text{ }\mu\text{V/V}$.



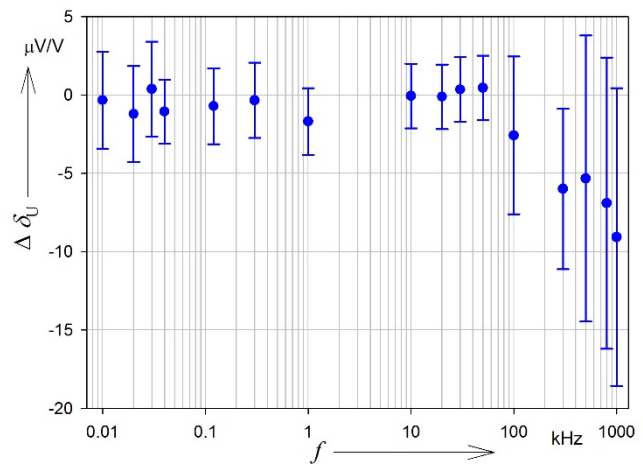
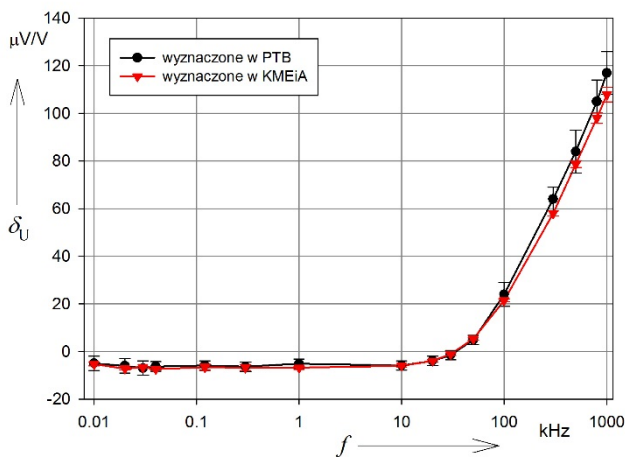
Rys. 6. Trójnik opracowany w KMEiA, wykorzystany do połączenia należącego do GUM wzorca z systemem pomiarowym KMEiA. Trójnik jest wyposażony w dwa złącza N oraz złącze GR-874



Rys. 7. Spójność pomiarów różnicy transferowej przetworników biorących udział w badaniach przy wybranych częstotliwościach: a) 120 Hz, b) 1 kHz, c) 100 kHz, d) 1 MHz

a)

b)



Rys. 8. Różnica transferowa wzorca 2 V, deklarowana przez GUM oraz zmierzona względem wzorca pierwotnego 3 V KMEiA: a) wartości różnic transferowych, b) różnice między wynikami wyznaczonymi w PTB oraz zmierzonymi względem wzorca pierwotnego KMEiA. Na wykresie zaznaczono złożone niepewności pomiaru dla $k = 2$

Wyniki komparacji

Na rys. 8 przedstawiono różnice transferowe wzorca napięcia przemiennego 2 V GUM, wyznaczone podczas kalibracji w PTB oraz zmierzone w KMEiA. W trakcie komparowania wzorców wykryto dużą wrażliwość wzorca GUM na wstrząsy mechaniczne. Po uzyskaniu zgody GUM dokonano w KMEiA naprawy tego wzorca, polegającej na usunięciu z obwodu grzejnika dwóch niestabilnych elektrycznie połączeń lutowanych. Naprawa ta mogła spowodować zmianę wartości różnicy transferowej tego wzorca względem wartości zmierzonych w PTB.

Dla częstotliwości większych od 40 Hz różnice transferowe wzorca GUM wyznaczone przez porównanie z pierwotnym wzorcem napięcia przemiennego KMEiA o napięciu wejściowym 3 V. Dla częstotliwości mniejszych od 100 Hz wykorzystano metodę porównania z wzorcem o wyższym napięciu wejściowym ($U_N = 10$ V), opisaną w [6]. W metodzie tej wykorzystuje się zjawisko zmniejszania się różnicy transferowej TPWS ze zmniejszaniem się mocy Joule'a wydzielanej w grzejniku przetwornika. Dla bardzo małej mocy wydzielanej w grzejniku przetwornika jego różnica transferowa przetwornika staje się bardzo mała (z reguły < 1 μ V/V).

Wyniki komparacji przedstawione na rys. 8 ilustrują dobrą zgodność wartości różnic transferowych wzorca państwowego 2 V utrzymywanego w GUM, oraz wzorca pierwotnego KMEiA. Rozbieżność pomiędzy nimi wzrasta wraz z częstotliwością. Jest ona spowodowana między innymi inną geometrią i konstrukcją trójnika, zastosowanego podczas kalibracji wzorca GUM w PTB oraz zmianą parametrów wzorca GUM po jego naprawie w KMEiA.

Wnioski

Przeprowadzone porównanie wykazało dobrą zgodność wartości różnic transferowych wzorca 2 V GUM, zdeterminowanych podczas kalibracji w PTB z wartościami różnic transferowych wzorca pierwotnego 3 V, opracowanego w KMEiA. Również spójność przeprowadzonych pomiarów jest bardzo dobra, co zwiększa wiarygodność uzyskanych wyników. Rozbieżności pomiędzy wyznaczonymi wartościami różnicy transferowej w PTB oraz KMEiA są mniejsze od złożonej niepewności pomiaru różnicy transferowej. Wyniki przeprowadzonego porównania potwierdzają możliwość wyeliminowania konieczności kalibracji elementów polskiego wzorca napięcia elektrycznego przemiennego poza granicami naszego kraju. Oczywiście nie eliminuje to wymogu

przeprowadzania okresowych komparacji międzylaboratoryjnych.

Autorzy: 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; dr inż. Michał Grzenik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: michal.grzenik@polsl.pl; inż. Jerzy Szutkowski, Główny Urząd Miar w Warszawie, Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, E-mail: j.szutkowski@gum.gov.pl; inż. Paweł Zawadzki, Główny Urząd Miar w Warszawie, Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, E-mail: p.zawadzki@gum.gov.pl.

LITERATURA

- [1] Grzenik M., Kampik M., Calculable AC Voltage Standards for 10 kHz-1 MHz Frequency Range, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 6 (2017), pp. 1372 – 1378
- [2] Grzenik M., Kampik M., Determination of AC-DC Transfer Difference of SUT Calculable Thermal Voltage Converters in 1 MHz - 30 MHz Frequency Range, *Proc. of CPEM'18*, Paris, 2018
- [3] 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.*, vol. 66, no. 6 (2017), pp. 1379 – 1384
- [4] Kampik M., Grzenik M., Lippert T., Rydler K.-E., Tarasso V., Trilateral comparison of a planar thin-film thermal AC voltage standard in frequency range 1 MHz - 30 MHz, *CPEM 2018 Digest*, Paris, France, Jul. 2018
- [5] Kampik M., Wielofunkcyjne urządzenie automatyzujące transfer ac-dc, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Nr 6, 2004, str. 22-23
- [6] Funck T., Kampik M., Kessler E., Klonz M., Laiz H., Lapuh R., Determination of the ac-dc voltage transfer difference of high-voltage transfer standards at low frequencies, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, no. 2 (2005), pp. 807-809
- [7] <https://www.pasternack.com/n-male-male-male-tee-adapter-pe9390-p.aspx>
- [8] Sasaki H., Inglis B.D., Takahashi K., Klonz M., Determination of the time constants of thermoelectric effects in thermal converters using a fast-reversed dc, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, pp. 377 – 381, Apr. 1997.
- [9] Grzenik M., Kampik M., Determination of Frequency-Independent Component of AC-DC Transfer Difference of SUT's Calculable AC Voltage Standards, *I2MTC Proceedings*, Houston, Texas, 2018