

Etalon napięcia przemiennego

Streszczenie. W artykule omówiono zakres prac związanych z opracowaniem pierwotnego wzorca napięcia przemiennego. Przedstawiono realizację wzorca pierwotnego złożonego z zestawu termicznych przetworników wartości skutecznej, utrzymywanego w Laboratorium Wzorców AC-DC Politechniki Śląskiej.

Abstract. The scope of work related to the development of the primary AC voltage standard is discussed in the article. The paper presents the realization of the primary AC voltage standard made of a set of thermal converters maintained in the Laboratory of AC-DC Standards at Silesian University of Technology (**Primary AC voltage standard**).

Słowa kluczowe: wzorec napięcia przemiennego, transfer AC-DC, termiczny przetwornik wartości skutecznej

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

doi:10.12915/pe.2014.11.07

Wstęp

Pomimo dynamicznego rozwoju kwantowych wzorców napięcia przemiennego w dalszym ciągu w najdokładniejszych wzorcach napięcia przemiennego wykorzystywane są termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS) i specjalizowane, zautomatyzowane stanowiska wzorcujące.

W ramach projektu rozwojowego, sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (nr umowy R01003010), w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach opracowano i zbudowano wzorec pierwotny napięcia przemiennego, którego właściwości metrologiczne nie muszą być określane przez wzorcowanie w NMI¹ innego państwa. Niezbędna jest jedynie interkomparacja z wzorcami zagranicznymi, mająca na celu uwiarygodnienie wyników. Jest to postępowanie rutynowe, stosowane przez NMI i laboratoria współpracujące o najwyższym poziomie w hierarchii wzorców.

Ogólna charakterystyka etalonu

Etalon jest złożony z 26 wzorców, które pokrywają zakres napięcia przemiennego od 0,5 V do 1000 V oraz pasmo częstotliwości od 10 Hz do 1 MHz (rys.1).



Rys.1. Widok fragmentu zestawu wzorców napięcia przemiennego

We wzorcach wykorzystano jedno² - i wielozłączowe³ oraz hybrydowe termiczne przetworniki wartości skutecznej, charakteryzujące się bardzo dobrymi właściwościami metrologicznymi [1,2,3]. W celu ułatwienia wykrycia błędu systematycznego lub ujawnienia ewentualnego dryfu czasowego parametrów metrologicznych przetworników zastosowano TPWS produkowane przez trzech

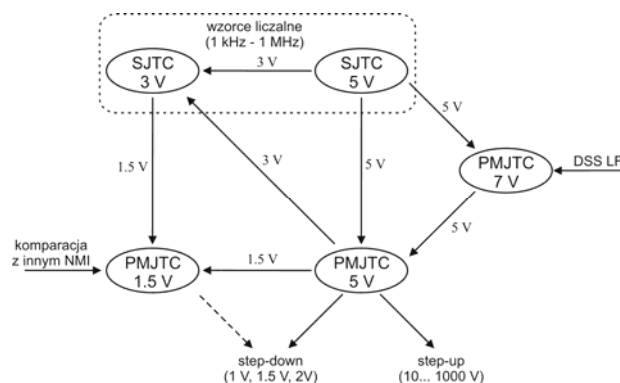
¹ Krajowe Instytuty Metrologiczne (ang. *National Metrology Institutes*)

² SJTC - jednozłączowy przetwornik wartości skutecznej (ang. *Single Junction Thermal Converter*)

³ PMJTC – wielozłączowy planarny przetwornik wartości skutecznej (ang. *Planar Multijunction Junction Thermal Converter*)

producentów w różnych regionach świata (USA, Niemcy, Japonia).

Trzon etalonu stanowi pięć wzorców tworzących schemat porównań przedstawiony na rys. 2.



Rys.2. Struktura etalonu napięcia przemiennego

Wzorce oznaczone przez SJTC 3V oraz SJTC 5V są wzorcami liczalnymi, tj. ich różnica transferowa jest wyznaczona teoretycznie (obliczona) w paśmie 1 kHz – 1 MHz na podstawie modelu matematycznego, przedstawionego w [4]. Są to wzorce zawierające w swojej wspólności obudowie rezystor szeregowy w postaci drutu oporowego o małej średnicy oraz jednozłączowy TPWS. Wzorce SJTC 3V oraz SJTC 5V różnią się kilkoma krytycznymi parametrami konstrukcyjnymi, m.in. długością oraz średnicą drutu oporowego, wykorzystanego do konstrukcji rezystora. Odpowiedni dobór nominalnych napięć wejściowych SJTC 3V oraz SJTC 5V umożliwia dokonanie ich komparacji przy napięciu w zakresie od 2,5 do 3 V, co pozwala na bezpośrednią empiryczną weryfikację poprawności ich modeli matematycznych w paśmie 1 kHz – 1 MHz oraz różnic transferowych wyznaczonych innymi metodami w paśmie 10 Hz - 1 kHz. Jest to realizowane za pomocą systemu pomiarowego opisanego w [5].

Wzorec PMJTC 1,5V jest tzw. "wzorcem podróznym" (ang. *travelling standard*), który jest wykorzystywany w komparacjach międzylaboratoryjnych. Może on być również wykorzystany do wzorcowania przetworników o nominalnym napięciu wejściowym równym 1 V; 1,5 V oraz 2 V.

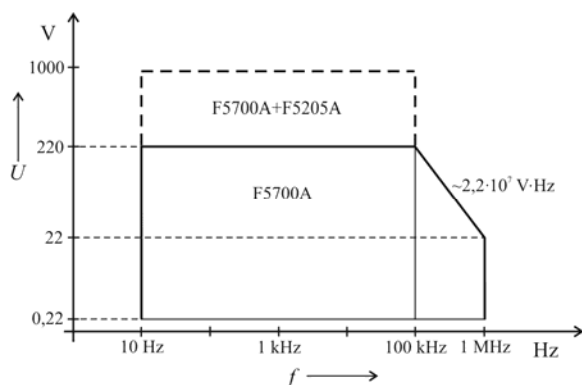
We wzorcu PMJTC 7V zastosowano hybrydowy przetwornik wielozłączowy o rezystancji grzejnika równej 500 Ω. Jest to przetwornik o odmiennej konstrukcji od pozostałych TPWS i charakteryzuje się bardzo dużą

przełączalnością. Jego nominalne napięcie wejściowe jest równe 7 V, co pozwala na pomiar jego różnicy transferowej za pomocą cyfrowego źródła wzorcowego napięcia przemiennego (oznaczonego przez DSS LF na rys.2), które w trakcie swojej kalibracji podaje na wejście badanego TPWS napięcie stałe o wartości ok. 1,4 razy większej od wartości skutecznej napięcia, przy której realizowany jest później pomiar.

Struktura przedstawiona z prawej strony rys. 2 zawiera trójkąt trzech przetworników: SJTC 5 V, PMJTC 5 V oraz PMJTC 7 V, które tworzą grupę wzorców komparowanych przy tym samym napięciu równym 5 V. Konstrukcja każdego z tych przetworników jest inna, co zmniejsza możliwość jednostronnego dryftu czasowego różnic transferowych wszystkich trzech wzorców. Minimalizowany jest przez to błąd systematyczny związany ze starzeniem wzorców.

Struktura przedstawiona na rys. 2 jest otwarta: możliwe jest dołączenie do niej dodatkowych wzorców i przeprowadzenie porównań. Porównania te tworzyć mogą zamknięte cykle (schematy) o strukturze czworokąta, trójkąta itp. Zamknięte cykle porównań przedstawione na rys. 2 można wykorzystać do weryfikacji poprawności wyznaczenia różnicy transferowej wzorców oraz minimalizacji wpływu ewentualnych błędów losowych. Opracowana została odpowiednia procedura statystyczna, która umożliwi zminimalizowanie wpływu błędów losowych na wyniki komparacji wzorców.

Zakres napięcia i częstotliwości, przy których możliwe jest użytkowanie etalonu jest ograniczony możliwościami źródła napięcia przemiennego, którym jest kalibrator Fluke 5700A (F5700A) oraz wzmacniacz mocy wysokiego napięcia Fluke 5205A (F5205A). Zależność napięcia od częstotliwości przedstawiono na rys. 3. Podobne ograniczenie występuje w przypadku wszystkich znanych autorom laboratoriów realizujących wzorzec napięcia przemiennego na najwyższym poziomie dokładności.



Rys.3. Zakres napięcia i częstotliwości przy których możliwe jest użytkowanie etalonu

Metodyka determinowania różnicy transferowej wzorców tworzących etalon

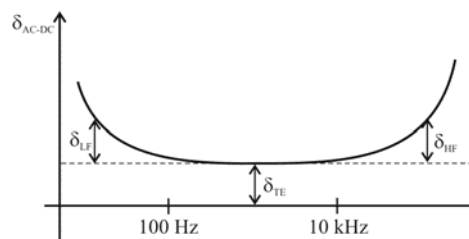
Typową charakterystykę częstotliwościową różnicy transferowej termicznego wzorca napięcia przemiennego przedstawiono na rys. 4.

Różnice transferowe wzorców pierwotnych o nominalnych napięciach wejściowych 3 V oraz 5 V zostały wyznaczone w trzech przedziałach częstotliwości, w których ujawniają się i dominują różne zjawiska:

a) w paśmie częstotliwości od 10 Hz do około 100 Hz, w którym składowa różnicy transferowej TPWS δ_{LF} jest zdeterminowana przede wszystkim nieliniowymi zjawiskami transportu ciepła z grzejnika TPWS do otoczenia;

b) w paśmie częstotliwości od około 100 Hz do około 10 kHz, w którym różnica transferowa δ_{TE} jest zdeterminowana przede wszystkim zjawiskami termoelektrycznymi występującymi w grzejniku TPWS;

c) w paśmie częstotliwości od około 10 kHz do około 1 MHz, w którym składowa różnicy transferowej TPWS δ_{HF} jest zdeterminowana przede wszystkim zależnymi od częstotliwości parametrami resztkowymi obwodu grzejnika, rezystora zakresowego oraz zastosowanego złącza wejściowego.

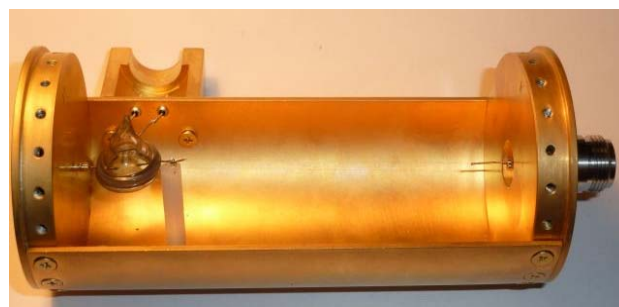


Rys.4. Typowy przebieg charakterystyki częstotliwościowej różnicy transferowej termicznego wzorca napięcia przemiennego

Ad. a) w paśmie częstotliwości od 10 Hz do około 100 Hz zastosowano metodę polegającą na zdeterminowaniu różnicy transferowej przez jej pomiar względem PMJTC o zredukowanej mocy wydzielanej w grzejniku [6,7] oraz metody wykorzystującej cyfrowe źródło napięcia przemiennego o małej częstotliwości [8,9]. W tym zakresie częstotliwości standardowa niepewność zdeterminowania różnicy transferowej wzorców o napięciu wejściowym z przedziału od 1 V do 6 V jest równa około 2 $\mu\text{V/V}$.

Ad. b) w paśmie częstotliwości od około 100 Hz do około 10 kHz zmierzono różnicę transferową wzorców za pomocą źródła wzorcowego napięcia prostokątnego [10]. W tym celu opracowano i zbudowano źródło, wytwarzające takie napięcie. Standardowa niepewność zdeterminowania różnicy transferowej wzorców o napięciu wejściowym z przedziału od 1 V do 6 V jest rzędu 1 $\mu\text{V/V}$.

Ad. c) w paśmie częstotliwości od około 10 kHz do 1 MHz różnicę transferową wyznaczono teoretycznie w sposób opisany w [4,11,12,13]. W tym celu opracowano matematyczny model wzorca oraz zdeterminowano właściwości fizyczne materiałów, z których został on wykonany. W opisany sposób wyznaczono różnicę transferową jedynie dla trzech współosiowych wzorców zintegrowanych z drutowym rezystorem zakresowym o nominalnych napięciach wejściowych odpowiednio 3 V oraz 5 V. Standardowa niepewność zdeterminowania różnicy transferowej tych wzorców zwiększa się ze wzrostem częstotliwości i osiąga wartość równą około 5 $\mu\text{V/V}$ przy 1 MHz. Widok wnętrza jednego ze wzorców o liczalnej różnicy transferowej przedstawiono na rys. 5.



Rys.5. Widok wnętrza liczalnego wzorca pierwotnego

Różnice transferowe pozostałych wzorców wchodzących w skład etalonu zmierzono przez komparację ze wzorcami o napięciu nominalnym z przedziału od 3 V do 7 V, których różnice transferowe wyznaczono wymienionymi powyżej metodami. Z tego powodu opracowane zostały odpowiednie procedury pomiarowe, umożliwiające przeniesienie miary z wzorców o niskich napięciach na wzorce o napięciu wyższym (ang. *step up*) oraz z wzorców o wyższych napięciach na wzorce o napięciu niższym (ang. *step down*). Niepewność różnicy transferowej etalonu (w $\mu V/V$, $k=2$) przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Niepewność różnicy transferowej etalonu (w $\mu V/V$, $k=2$)

Napięcie (V)	10 Hz	40 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz	100 kHz	1 MHz
0,5	2	2	2	2	2	2	3	4
1	2	2	2	2	2	2	3	4
1,5	2	2	2	2	2	2	2	4
2	2	2	2	2	2	2	2	4
5	2	2	2	2	2	2	2	3
10	2	2	2	2	2	2	2	4
20	4	2	2	2	2	2	3	4
100	4	3	3	5	6	9	11	-
200	5	4	4	7	8	14	24	-
500	5	5	5	9	10	17	32	-
1000	5	5	6	10	12	20	43	-

Laboratorium Wzorców AC-DC

Uzyskanie odpowiednich parametrów metrologicznych etalonu nie jest możliwe bez utrzymywania i użytkowania go w ściśle określonych warunkach środowiskowych. Z tego powodu w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej zbudowano Laboratorium Wzorców AC-DC wyposażone w elektromagnetycznie ekranowaną kabinę pomiarową o stabilizowanej temperaturze i wilgotności. Konstrukcja kabiny zapewnia tłumienność zaburzeń promieniowanych w paśmie częstotliwości od 100 kHz do 6 GHz i przewodzonych większą od 60 dB. Wysoka tłumienność zaburzeń elektromagnetycznych umożliwia zmniejszenie wpływu zewnętrznych pól elektromagnetycznych na dokładność pomiarów wykonywanych w kabinie.

Temperatura i wilgotność wewnątrz kabiny jest stabilizowana przez oryginalny system stabilizacji warunków środowiskowych.

W obszarze nad powierzchniami roboczymi stanowisk pomiarowych, temperatura wynosi 23,0°C z dopuszczalnym dryfem nie przekraczającym $\pm 0,2$ K na godzinę [14]. Dopuszczalne wahania wilgotności względnej nie przekraczają $\pm 10\%$ na dobę.

Laboratorium Wzorców AC-DC jest wyposażone w odpowiednią infrastrukturę teleinformatyczną, umożliwiającą zdalne monitorowanie pomiarów oraz sterowanie systemem pomiarowym poprzez Internet. Dzięki temu nie jest wymagana obecność operatora w kabinie, co eliminuje jego wpływ na wynik wzorcowania (np. przez zaburzenie pola temperatury).

Od 2014 roku w Laboratorium Wzorców AC-DC rozpoczęto wdrażanie systemu jakości. Opracowana została odpowiednia dokumentacja, obejmująca m.in. Księgę Procedur Ogólnych i Księgę Procedur Kalibracyjnych. Przy tworzeniu dokumentacji jakościowej uwzględniono wymogi stawiane laboratoriom wzorcującym ubiegającym się o akredytację Polskiego Centrum Akredytacji zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025.

Podsumowanie

Opracowano i zbudowano etalon napięcia przemiennego o właściwościach metrologicznych porównywalnych z

właściwościami etalonów państw wysokorozwiniętych. Etalon umożliwia wzorcowanie TPWS w paśmie częstotliwości od 10 Hz do 1 MHz oraz w przedziale napięcia od 0,5 V do 1000 V. Stanowisko badawczo-wzorcujące, zlokalizowane w Laboratorium Wzorców AC-DC, umożliwia realizację napięciowego transferu AC-DC na najwyższym osiągalnym poziomie dokładności.

Zespół autorów ma nadzieję, iż opracowany etalon przyczyni się do poprawy spójności pomiarowej w powszechnie wykonywanych w przemyśle i badaniach naukowych pomiarach napięcia przemiennego i wywrze pozytywny wpływ na funkcjonowanie gospodarki naszego kraju.

LITERATURA

- [1] Levinson B.: A computerized model of vacuum thermocouple performance, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 40 (1991), 356-359.
- [2] Laiz H., Klonz M., Kessler E., Kampik M., Lapuh R.: Low-Frequency AC-DC Voltage Transfer Standards with New High Sensitivity and Low-Power-Coefficient Thin-Film Multijunction Thermal Converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 52 (2003), No. 2, 350-354.
- [3] Fujiki H.: Development of Thin-Film Multijunction Thermal Converters with a Novel Structure, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60 (2011), No. 7, 2725-2729.
- [4] Grzenik M., Kampik M.: Matematyczny model wzorca napięcia przemiennego, *Przegląd Elektrotechniczny* (2013), Nr. 4, 214-216.
- [5] Kampik M.: Stanowisko do wzorcowania termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego, *Przegląd Elektrotechniczny* (2010), Nr.1, 239-244.
- [6] Kampik M.: Metoda wzorcowania planarnych wielozłączowych termicznych przetworników wartości skutecznej w zakresie częstotliwości 10... 100 Hz. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004, s. Elektryka, z. 190, 7-16.
- [7] 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.* 54 (2005), No. 2, 807-809.
- [8] Kampik M.: Cyfrowe źródła wzorcowego napięcia przemiennego o małej częstotliwości, Monografia 224, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
- [9] Kampik M.: Comparison of Non-Quantum Methods for Calibration of the Digital Source of Very-Low-Frequency AC Voltage, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (2013), No. 6, 1615-1620.
- [10] Klonz M., Spiegel T., Zirpel, R., Inglis B., Hammond G., Sasaki H., Takahashi K., Stojanovic B.: Measuring thermoelectric effects in thermal converters with a fast reversed DC. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 44 (1995), No. 2, 379-382.
- [11] Grzenik M., Kampik M., Wpływ parametrów konstrukcyjnych na różnicę transferową wzorca napięcia przemiennego, *Przegląd Elektrotechniczny* (2013) nr. 5, 245-247.
- [12] Grzenik M., Kampik M.: Thermal AC voltage standards with calculable AC-DC transfer difference in frequency range from 10 kHz to 1 MHz, *Proc. of 19th IMEKO TC-4 Symposium on Measurements of Electrical Quantities*, Barcelona, Spain, July 18th -19th, 2013, ISBN: 978-84-616-5438-3.
- [13] Kampik M., Grzenik M., Musioł K.: Wzorce napięcia przemiennego o liczalnej różnicy transferowej w paśmie częstotliwości 10 kHz - 1 MHz, *PAK*, (2013), Nr. 5, 418-421.
- [14] Kampik M., Domański W., Grzenik M., Majchrzak K., Musioł K., Tokarski J.: System stabilizacji warunków środowiskowych w Laboratorium Wzorców AC-DC, *PAK*, (2014), Nr. 2, 73-76.

Autorzy: dr hab. inż. Marian Kampik, dr inż. Krzysztof Musioł, mgr inż. Michał Grzenik, Politechnika Śląska, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: marian.kampik@polsl.pl, krzysztof.musiol@polsl.pl, michal.grzenik@polsl.pl