

## Andrzej BARAŃSKI, Jacek RATAJCZAK, Paweł ZAWADZKI

GŁÓWNY URZĄD MIAR, ZAKŁAD METROLOGII ELEKTRYCZNEJ, LABORATORIUM NISKICH NAPIĘĆ I PRĄDÓW

### Przetworniki termoelektryczne AC/DC jako wzorce napięcia przemiennego

Dr n. techn. Andrzej BARAŃSKI

Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej ukończył w 1967 r., doktorat w 1981 r. Od 1972 do 1991 r. adiunkt w Głównym Urzędzie Miar, obecnie kierownik laboratorium. Specjalista w dziedzinie pomiarów niskich napięć i prądów oraz zastosowań przetworników termoelektrycznych jako wzorców AC/DC. Autor około 140 publikacji z dziedziny metrologii elektrycznej, historii nauki i techniki.



e-mail: [electricity@gum.gov.pl](mailto:electricity@gum.gov.pl)

Mgr inż. Jacek RATAJCZAK

Studia na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej ukończył w 1991 r. Od 2002 r. st. metrolog w Głównym Urzędzie Miar, specjalista w dziedzinie utrzymania wzorców odniesienia napięcia i prądu przemiennego.



e-mail: [electricity@gum.gov.pl](mailto:electricity@gum.gov.pl)

Lic. Paweł ZAWADZKI

Licencjat w zakresie informatyki uzyskał w 2000 r. Obecnie kontynuuje studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Od 1998 r. st. metrolog w Głównym Urzędzie Miar, specjalista w dziedzinie utrzymania wzorców odniesienia napięcia i prądu.



e-mail: [electricity@gum.gov.pl](mailto:electricity@gum.gov.pl)

#### Streszczenie

Pomiary napięcia przemiennego w Głównym Urzędzie Miar są odnoszone do wzorców odtwarzanych przy napięciu stałym, wg zasady komparacji niejednoczesnej. W charakterze wzorca odniesienia przy napięciu przemiennym stosowane są zestawy przetworników termoelektrycznych. Struktura wzorca, dzięki różnym konfiguracjom, umożliwia pokrycie potrzeb wzorcowania tej wielkości do 1200 V i częstotliwości do 1 MHz. Omówiono istotę i źródła błędów komparacji, oraz sposób jego kompensacji. Schemat interkomparacji wzorca umożliwia odniesienie całej dziedziny do jednego przetwornika bazowego 1 VAC.

**Słowa kluczowe:** przetworniki termoelektryczne AC/DC, napięcie przemiennie, wartość skuteczna.

### AC/DC thermal transfer converters as AC voltage standards

#### Abstract

AC voltage measurements at the Central Office of Measures are being referenced to the standards restored at the DC voltage according to the principle of anti-coincidental comparison. As an AC voltage reference standard sets of thermoelectric converters are being used. Thanks to different configurations, the structure of the standard, enables covering the calibration needs of this quantity up to 1200 V at the frequency of up to 1 MHz. The nature and sources of comparison error were discussed as well as the way of its compensation. The schematic diagram of intercomparison enables referencing the whole field to one 1 VAC base converter.

**Keywords:** AC/DC thermal transfer converter, AC voltage, True RMS.

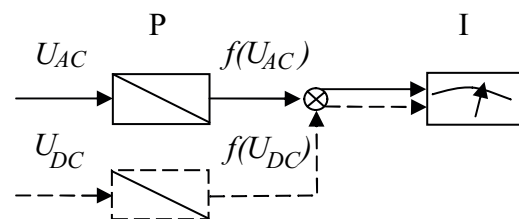
## 1. Wprowadzenie

Nieznane są w chwili obecnej na świecie sposoby odtwarzania jednostki napięcia/prądu przemiennego za pośrednictwem wzorców parametrycznych, odpowiedników np. ogniwa Westona, choć prace nad wykorzystaniem w charakterze wzorca AC efektu Josephsona są daleko zaawansowane. Pomiary napięcia

przemiennego najczęściej są odnoszone do wzorców odtwarzanych przy napięciu stałym za pośrednictwem przetworników wartości skutecznej. Wartość ta bowiem jest najbardziej w technice pożądana, gdyż rządzi przemianą energii elektrycznej na inne jej postaci (światłą, ciepłą, mechaniczną, chemiczną itp.), a przyrządy pomiarowe najczęściej bezpośrednio wskazują lub są wyskalowane w wartościach skutecznych. Wartość tę najwierniej odtwarzają przetworniki termiczne, które zazwyczaj są stosowane właśnie jako wzorce napięcia/prądu przemiennego. Nie są one jedynymi środkami pomiarowymi służącymi do odtwarzania jednostki lecz wydatnie zdystansowały inne konstrukcje, zarówno pod względem zakresów częstotliwościowych jak i niepewności pomiaru. Mimo pewnych wad, jak np.: duża inercja i dryft czasowy, łatwość przeciążenia i uciążliwość eksploatacji, brak wyraźnych przesłanek do rezygnacji ze stosowania ich jako urządzeń transferowych. Stosunkowo najlepiej do tego celu nadają się przetworniki termoelektryczne AC/DC typu jedno- i wielozłazkowego [1, 2], których zestawy stanowią bazę odniesienia w pomiarach napięcia przemiennego do około 1kV i częstotliwości do 1MHz. Wykonywane są one jednostkowo przez wyspecjalizowanych producentów dla potrzeb krajowych instytucji metrologicznych różnych krajów. Produkowane w wykonaniach komercyjnych przetworniki wielozakresowe, najczęściej stanowią wzorce dla laboratoriów wzorcujących.

## 2. Istota pomiaru napięcia przemiennego

Najczęściej stosowanym sposobem transferu napięcia przemiennego jest *komparacja niejednoczesna* (rys. 1).



Rys. 1. Ilustracja zasady komparacji niejednoczesnej: P – przetwornik termoelektryczny, I – woltomierz cyfrowy, kompensator Lindecka lub inne urządzenie wskazujące.

Fig. 1 Illustration of the anti-coincidental comparison principle: P – thermoelectric converter, I – indicating device, e.g. Lindeck's compensator or a DVM of the anti-coincidental comparison principle.

Przetworzona na siłę elektromotoryczną wielkość mierzona jest porównywana z równoważną siłą elektromotoryczną, jako funkcją sygnału napięcia stałego, o znanej wartości. Wartość tę adiustuje się aż do uzyskania tego samego odczytu na urządzeniu wskazującym, tzn., gdy:

$$f(U_{AC}) = f(U_{DC}) \quad (1)$$

gdzie:  $U_{AC}$  – napięcie przemiennie (wartość skuteczna);  $U_{DC}$  – napięcie stałe.

Formuła (1) wiąże z sobą obydwie wielkości prostą zależnością:

$$U_{AC} = kU_{DC} \quad (2)$$

gdzie:  $k = (1 + \delta_{AC})$ , tzn.  $k$  – współczynnik proporcjonalności, przy czym:  $\delta_{AC}$  – błąd komparacji napięcia przemiennego ze stałym.

Błąd komparacji napięcia przemiennego ze stałym jest więc podstawowym parametrem każdego przetwornika wartości skutecznej. Najczęściej wyznacza się go przez porównanie dwóch przetworników, z których jeden uznaje się jako wzorcowy, tj. taki którego błąd komparacji jest znany. Ta relatywna zasada ma jednak ograniczenie „odgórne”. Dotyczy to przetworników o najwyższych parametrach, których porównanie z dokładniejszymi staje się już niemożliwe. W tym przypadku stosuje się bezwzględny sposób wyznaczania błędu  $\delta_{AC}$ , którego teorię dla przetwornika termoelektrycznego jednozłączowego w 1952 r. po raz pierwszy opracował L.F. Hermach [3], wiążąc ją ze stałymi fizycznymi:

$$\delta_{AC/DC} = -25H\Theta_{DC}\rho^2 \quad (3)$$

gdzie:  $H = h + 0,5 ab$ , w którym:  $h$  - zmienna, zależna od współczynnika temperaturowego rezystancji grzejnika, jego wymiarów, konduktywności, emisyjności całkowitej i stałej Stefana-Boltzmana;  $a$  i  $b$  – stałe, występujące w równaniu przyrostów siły elektromotorycznej w funkcji zmian temperatury ( $\Delta E = a\Theta_{DC} + 0,5b\Theta_{DC}^2$ ; w którym:  $\Theta_{DC}$  – przyrost temperatury w środkowym punkcie grzejnika przy prądzie stałym);  $\rho = 4D/\omega l$ , w którym  $D$  – cieplna dyfuzyjność materiału, z którego wykonano grzejnik;  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  – częstotliwość prądu grzejnika,  $l$  – długość grzejnika).

1 V T1	2 V T2	4 V T3
3 V T1 + A	2 V T2 + A	12 V T3 + A
10 V T1 + B	2 V T2 + B	40 V T3 + B
30 V T1 + C	2 V T2 + C	120 V T3 + C
100 V T1 + D	2 V T2 + D	400 V T3 + D
300 V T1 + E	2 V T2 + E	1200 V T2 + E

Rys. 2. Struktura wzorca GUM napięcia przemiennego.  
Fig. 2. Structure of the GUM AC voltage standard.

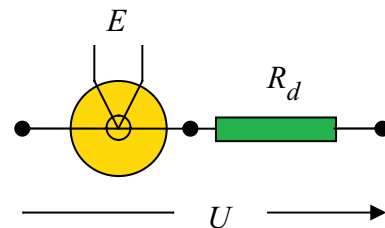
Ten sam badacz podał także przybliżone rozwiązania równań nieliniowych, rządzących przemianą prądu elektrycznego w ciepło z uwzględnieniem zjawisk Thompsona i Peltiera.

Wzorcowanie wg teorii Hermach jest tak technicznie złożone,

że realizują je tylko nieliczne *krajowe instytucje metrologiczne* na świecie, np.: National Institute of Standards and Technology (USA), National Physical Laboratory (W. Bryt.), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Niemcy).

### 3. Struktura wzorca

W Głównym Urzędzie Miar (GUM), mającym status *krajowej instytucji metrologicznej*, wzorcem napięcia przemiennego są przetworniki jednozłączowe wyposażone w rezystory dodatkowe wymienne, służące do rozszerzania zakresów napięciowych [4]. Na rys. 2 pokazano strukturę wzorca napięcia przemiennego.



Rys. 3. Przykład połączenia przetwornika z rezystorem dodatkowym  $R_d$ :  $E$  - siła elektromotoryczna wyjściowa,  $U$  - napięcie wejściowe.  
Fig. 3. Example of connection of a converter with an additional resistor  $R_d$ :  $E$  - output electromotive force,  $U$  - input voltage.

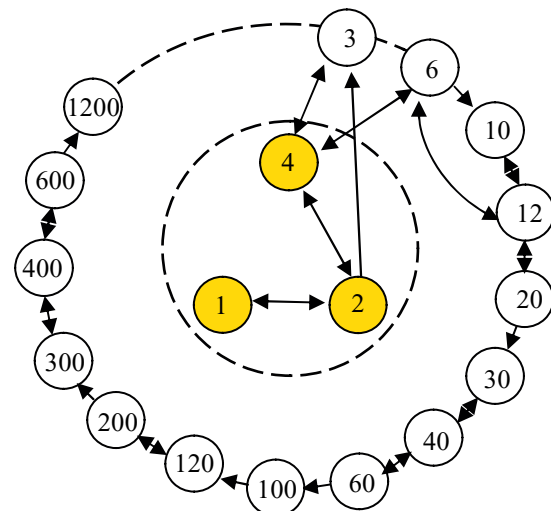
Zawiera ona trzy wymienne przetworniki termoelektryczne: T1, T2 i T3 o prądach grzejnika odpowiednio: 2,5 mA, 5 mA i 10 mA. Rozszerzenie podstawowych zakresów: 1 V, 2 V i 4 V jest możliwe przez szeregowe łączenie z nimi rezystorów: A, B, C, D i E. W ten sposób uzyskuje się pełne pokrycie charakterystyki pomiarowej wzorca w zakresie wymaganych wartości napięć i częstotliwości. Przyłożenie napięcia do wejścia zestawu pokazanego na rys. 3 powoduje wytworzenie się na wyjściu siły elektromotorycznej, zgodnie z charakterystyką przetwarzania:

$$E = c U^n \quad (4)$$

gdzie:  $c$  – współczynnik proporcjonalności,  $n = 1,8 \div 2$ , wykładnik funkcji przetwarzania.

### 4. Schemat interkomparacji

Jak łatwo zauważyć, funkcja (4) jest quasi-parabolą, której



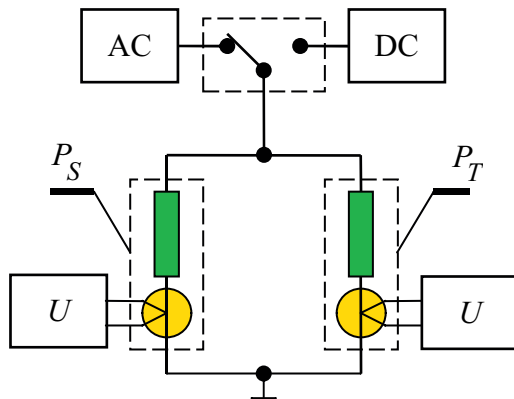
Rys. 4. Struktura drabinkowa interkomparacji wzorca od 1 V do 1200 V.  
Fig. 4. Ladder structure of intercomparison of the standard from 1 V to 1200 V.

największą czułość można uzyskać przy górnej wartości prądu pomiarowego.

Jest to ważna prawidłowość, którą wykorzystuje się przy

wzorcowaniu wszystkich elementów składowych wzorca. Schemat takiego wzorcowania, zwany „interkomparacją”, przypomina strukturę drabinkową, po której szczeblach dokonuje się wzorcowania wszystkich przetworników (rys. 4), od najniższych nominalów napięciowych kolejno po najwyższe [5]. Strzałki dwustronne wskazują możliwość porównań w granicach obszarów pełnej czułości przetworników. Pomiar wykonuje się dla różnych wartości napięć i częstotliwości. W ten sposób uzyskuje się spójność pomiarową w zakresie tzw. niskich napięć, tj. od 1V do 1200 V i częstotliwości od 10 Hz do 1 MHz.

Do przeprowadzenia interkomparacji służy komparator przetworników wzorcowych pokazany na rys. 5.



Rys. 5. Układ pomiarowy interkomparacji przetworników wzorcowych: AC, DC – źródła napięcia przemiennego i stałego,  $P_S$ ,  $P_T$  – przetworniki wzorcowy i testowany, U – mierniki napięcia.

Fig. 5. Measuring system for intercomparison of AC standard converters, DC – DC and AC voltage sources,  $P_S$ ,  $P_T$  – standard and test converters, U – voltmeters.

W układzie tym istnieje możliwość wyznaczenia różnicy błędów komparacji wg algorytmu:

$$\delta_T - \delta_S = \left[ \frac{E_{AC} - E_{DC}}{nE_{DC}} \right]_S \quad (5)$$

gdzie: indeksy  $T$  i  $S$  odnoszą się odpowiednio do przetwornika testowanego i wzorcowego,  $E_{AC}$ ,  $E_{DC}$  – siła elektromotoryczna wyjściowa przy napięciu przemiennym i stałym na wejściu przetwornika i gdy siła elektromotoryczna jest odczytywana na wyjściu przetwornika  $P_S$ .

Równanie jest słuszne dla warunku ustalonej siły elektromotorycznej na wyjściu przetwornika testowanego, tzn. gdy:

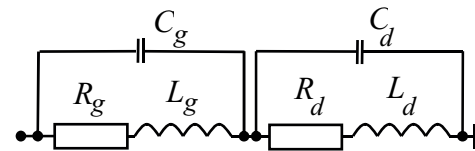
$$E_T = \text{const.} \quad (6)$$

Układ pomiarowy pokazany na rys. 5 może być sterowany ręcznie, zaś użycie źródeł napięcia (np. kalibratory) i nowoczesnych woltmierzów cyfrowych z interfejsem GPIB, umożliwiając jego automatyzację.

## 5. Źródła błędów komparacji

Źródłem błędów komparacji jest nieco inny rozkład ciepła wydzielającego się w przetworniku, przy przepływie równoważnych wartości napięcia stałego i przemiennego.

Przyczyna różnic tkwi w okresowości przebiegu krzywej i związanych z tym impedancjami wewnętrznymi przetwornika oraz rezystora dodatkowego. Uproszczony schemat zastępczy przetwornika jednozłączonego współpracującego z rezystorem dodatkowym podano na rys. 6.

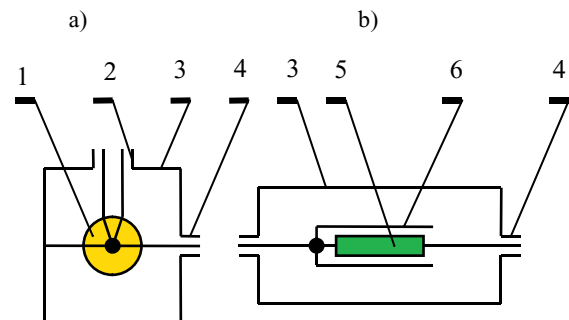


Rys. 6. Schemat zastępczy przetwornika jednozłączonego:  $R_g$ ,  $R_d$  – rezystancje grzejnika i rezystora dodatkowego;  $L_g$ ,  $L_d$  – indukcyjności grzejnika i rezystora dodatkowego;  $C_g$ ,  $C_d$  – pojemności własne grzejnika i rezystora.  
Fig. 6. Equivalent circuit diagram of a single-junction converter:  $R_g$ ,  $R_d$  – resistance of the heater and additional resistor,  $L_g$ ,  $L_d$  – inductances of the heater and additional resistor,  $C_g$ ,  $C_d$  – self-capacitance of the heater and resistor.

Błąd komparacji dla przyjętej konfiguracji i dla uproszczenia wynikających z  $R_d \gg R_g$  określa zależność:

$$\delta_{AC} = -\omega^2 \left( 0,5 \frac{L_g^2}{R_d^2} - L_g C_d + 0,5 C_d^2 R_d^2 \right) \quad (7)$$

Jak łatwo zauważyć błąd ma znak ujemny, co ułatwia kompensację, którą uzyskuje się przez stosowanie pojemności korekcyjnych (rys. 7). Najczęściej dobiera się je eksperymentalnie, przesuwając poosiowo pierścień korekcyjny lub stosując odpowiednie kondensatory.



Rys. 7. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego przetwornika jednozłączonego: a) termoelement w obudowie, b) rezystor dodatkowy wymienny. 1 – termoelement, 2 – gniazdo symetryczne, 3 – ekran, 4 – złącze koncentryczne, 5 – rezystor warstwowy, 6 – pierścień do korekcji częstotliwościowej.

Fig. 7. Example of construction of a single-junction converter: a) thermoelement in a housing, b) changeable additional resistor, 1 – thermoelement, symmetric socket, 3 – shielding, co-axial connector, 5 – planar resistor, 6 – frequency correction ring.

Korekcję przeprowadza się dla warunku  $\delta_{AC} = 0$ , tj. gdy

$$0,5 \frac{L_g^2}{R_d^2} - L_g C_k + 0,5 C_k^2 R_d^2 = 0 \quad (8)$$

zatem korekcja występuje przy pojemności:

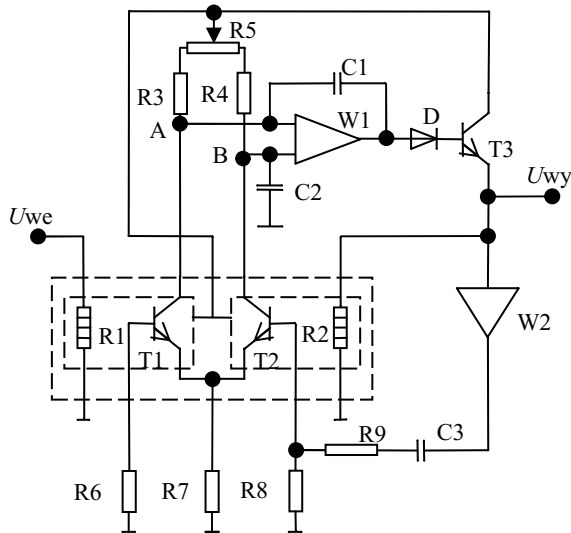
$$C_k = \frac{L_g}{R_d^2} \quad (9)$$

i jest uzyskiwana dla częstotliwości rezonansowej, a praktycznie dla pożądanego pasma częstotliwości.

## 6. Transfer jednostki

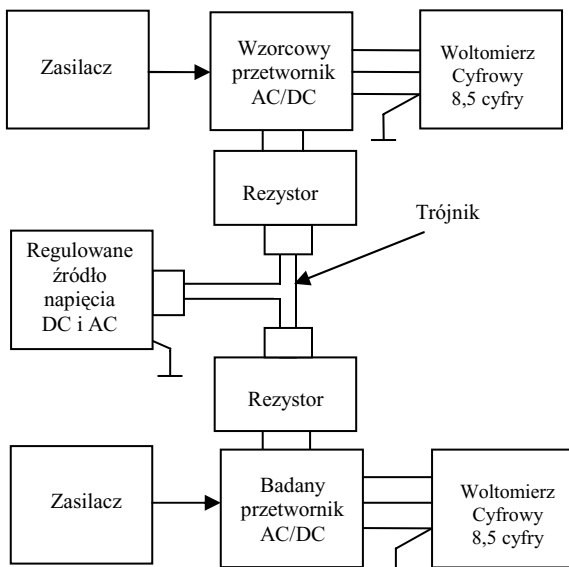
Niepewność wzorca AC wyznacza poziom dokładności pomiarów całej dziedziny pomiarów napięcia przemiennego. Kraje uprzemysłowione nie szczędzą środków i od lat prowadzą porównania międzylaboratoryjne swych wzorców AC/DC [6, 7], w celu uwiarygodnienia własnych baz odniesienia. Jednym z podstawowych zadań GUM jest także zapewnienie wysokiego poziomu dokładności parametru  $\delta_{AC}$ , zaś do zadań *laboratoriów wzorcujących* należy utrzymywanie jednolitości dystrybucji

jednostki, aż do najniższych szczebli hierarchii wzorcowania włącznie. *Laboratoria wzorcujące* są więc bezpośrednio zainteresowane poziomem transferu jednostki od bazy wzorcowniczej GUM na niższe szczeble hierarchii wzorcowania. Laboratoria te w łańcuchu dystrybucji jednostki stanowią więc ogniwo pośrednie między GUM a bezpośrednimi użytkownikami przyrządów pomiarowych. Odpowiednie czynności związane z transferem jednostki napięcia przemiennego w *laboratoriach wzorcujących* najczęściej są wykonywane za pomocą przetworników termicznych wielozakresowych.



Rys. 8. Układ przetwornika termicznego wykorzystujący elementy półprzewodnikowe.  
Fig. 8. Circuit diagram of the AC-DC thermal converter using semiconductor elements.

Istotę działania takiego przetwornika przedstawia rys. 8, w którym głównym elementem jest sensor termotranzystorowy składający się z pary tranzystorów i rezystorów grzejnych w układzie mostkowym. W układzie tym ponadto są wzmacniacze W1, W2, tranzystor T3 i dioda D [8].



Rys. 9. Układ komparacji dwóch przetworników termicznych wielozakresowych.  
Fig. 9. Circuit diagram of comparison of two multirange AC/DC thermal converter.

Wzmacniacz W1 realizuje statyczne, a wzmacniacz W2 dynamiczne, ujemne sprzężenie zwrotne. Moc wydzielona na rezystorze R1 pod wpływem napięcia  $U_{we}$  wywołuje zmianę napięcia baza-emiter tranzystora T1. Wskutek tego w punktach A

i B mostka złożonego z wzmacniacza różnicowego T1 i T2 oraz rezystorów R3, R4 i R5 pojawia się napięcie stałe. Napięcie to po wzmocnieniu za pomocą wzmacniacza W1 i tranzystora T3 jest podawane na rezystor grzejny R2, w rezultacie czego mostek zostaje sprowadzony do stanu bliskiego równowagi a napięcie wyjściowe  $U_{wy}$  jest funkcją mierzonego napięcia  $U_{we}$ . Napięcie to jest monitorowane przez woltmierz napięcia stałego. Jeśli  $U_{we}$  jest napięciem przemiennym, a następnie stałym, to przy ustalonej wartości napięcia  $U_{wy} = \text{const}$ . istnieje możliwość, sprowadzenia układu do stanu równowagi przy obydwu rodzajach zasilania; wówczas to zostanie spełniony warunek (1), który umożliwia odczyt wartości mierzonej.

Traktując dwa przetworniki termiczne wielozakresowe jako „czarne skrzynki” zadowalające wyniki ich komparacji uzyskuje się wykorzystując układ pomiarowy przedstawiony na rys. 9, w którym rezystory są wyposażeniem ww. przetworników, a obydwie woltmierze można zastąpić jednym, przełączalnym.

## 7. Podsumowanie

- Ze względu na duże rozpowszechnienie pomiarów napięcia przemiennego, wzorzec AC zajmuje ważną pozycję wśród jednostek elektrycznych.
- Stosunkowo najpełniej rolę wzorca pełnią przetworniki termoelektryczne przetwarzające napięcie/prąd na siłę elektromotoryczną.
- W GUM rolę wzorca AC pełni zestaw przetworników z wymiennymi rezystorami dodatkowymi. Dzięki uzyskanym 12 konfiguracjom łączeniowym istnieje możliwość pomiarów przedmiotowej wielkości w zakresie od 1V do 1200 V i częstotliwości od 10 Hz do 1 MHz.
- Błąd komparacji napięcia przemiennego ze stałym jest jednym z podstawowych parametrów definiujących wzorzec. Wyznacza się go drogą interkomparacji, wg zasady: niższy nominal napięciowy z wyższym.
- Dystrybucję jednostki, od wzorca GUM na niższe szczeble hierarchii wzorcowania, zapewniają *laboratoria wzorcujące* przy użyciu przetworników termicznych wielozakresowych.

## 8. Literatura

- [1] Klonz M.: CCE Comparison of AC-DC Voltage Transfer Standards at the Lowest Attainable Level of Uncertainty. IEEE Trans. on Instr. And Meas. 1997, vol. 46, nr 2, s. 342-346.
- [2] Laiz H., Klonz M., Kessler E., Kampik M., Lapuch R.: Low-Frequency AC-DC Voltage Transfer Standards With New High-Sensitivity and Low-Power\_Coefficient Thin-Film Multijunction Thermal Converters IEEE Trans. on Instr. And Meas. 2003, vol. 52, nr 2, s. 350-354.
- [3] Hermach LF.: Thermal Converters as AC-DC Transfer Standards for Current and Voltage Measurements at Audio Frequencies Journ. Of Res. Of the NBS, vol. 48, nr. 2 1952, s. 317-334.
- [4] Barański A., Podemski A.: Etalon napięcia przemiennego w zakresie do 1000V i częstotliwości do 100 kHz. Przegl. Elektrotech. 1991, s. 68-71.
- [5] Filipiński P., van Mullem C., Janik D., Klonz M., Kinard R., Lipe T., Waltrip B.: Comparison of High-Frequency AC-DC Voltage Transfer Standards at NRC, VSL, PTB and NIST. IEEE Trans. on Instr. and Meas. 2001, vol. 50, nr 4, s. 349-352.
- [6] Kürten W.G., Mohns E.: AC-DC transfer measurements of highest accuracy with synchronous analogue-to-digital conversion. Metrologia 41, 2004 , s. 111-115.
- [7] EA Interlaboratory Comparison EL25. AC-DC Voltage Transfer Difference COFRAC/LCIE Paris, 2002.
- [8] 792A AC/DC Transfer Standard Instruction Manual, rev. 1 12/92.