

Marian KAMPIK
Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej

METODA WZORCOWANIA PLANARNYCH WIELOZŁĄCZOWYCH TERMICZNYCH PRZETWORNIKÓW WARTOŚCI SKUTECZNEJ W ZAKRESIE CZĘSTOTLIWOŚCI 10, ..., 100 Hz^{*}

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę wzorcowania termicznych przetworników wartości skutecznej (TPWS) napięcia przemiennego. Wzorcowanie polega na komparacji przetwornika wzorcowanego z TPWS o zredukowanej mocy wydzielanej w grzejniku. Komparacja jest realizowana w układzie napięciowego transferu ac-dc. W metodzie nie jest wymagane użycie wzorcowego TPWS o różnicy transferowej obliczonej z dużą dokładnością. Wymaga się jedynie, aby parametr ten był odpowiednio mały ($<1 \cdot 10^{-5} \mu\text{V/V}$) oraz aby przetwornik wzorcowy charakteryzował się dużą czułością. Warunki te spełniają planarne wielozłączowe przetworniki wartości skutecznej.

A METHOD OF CALIBRATION OF PLANAR MULTIJUNCTION THERMAL CONVERTERS IN 10... 100 HZ FREQUENCY RANGE

Summary. The paper describes a method of calibration of thermal converters (TC) that are used as ac voltage standards. The calibration method is based on comparison of the thermal converter to be calibrated with the standard TC with reduced power developed in its heater. The calibration is performed in the ac-dc transfer measuring system. The method does not require a standard TC with accurately calculated ac-dc transfer difference. It is sufficient, when this parameter is small enough ($<1 \cdot 10^{-5} \mu\text{V/V}$) and the sensitivity of the standard TC is high. These conditions fulfill planar multijunction thermal converters (PMJTC).

1. WPROWADZENIE

We współczesnych etalonach napięcia przemiennego wykorzystuje się termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS), które umożliwiają odtworzenie napięcia przemiennego

* Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004 - 2006 jako projekt badawczy.

o wartości skutecznej z przedziału 0,5, ..., 1000 V i o częstotliwości 10 Hz ÷ 1 MHz. TPWS składa się z grzejnika oraz sprzężonego z nim termicznie czujnika termometrycznego. W jednozłączowych TPWS czujnikiem termometrycznym jest pojedynczy termoelement. W przetwornikach wielozłączowych występuje kilkadziesiąt termoelementów połączonych szeregowo. Napięcie wejściowe TPWS jest ograniczone do około 3, ..., 5 V, dlatego w celu rozszerzenia zakresu napięcia stosowane są rezystory zakresowe. Zależność pomiędzy napięciem wejściowym U oraz napięciem wyjściowym E przetwornika jest następująca:

$$E = S \frac{U^2}{R_G} = SP_G, \quad (1)$$

gdzie:

S jest czułością przetwornika, R_G jest rezystancją grzejnika, P_G jest mocą Joule'a wydzielaną w grzejniku.

2. PLANARNE WIELOZŁĄCZOWE TERMICZNE PRZETWORNIKI WARTOŚCI SKUTECZNEJ

Planarne wielozłączowe termiczne przetworniki wartości skutecznej (PMJTC) są odmianą wielozłączowych TPWS. Zostały opracowane w Federalnym Instytucie Fizyko-Technicznym (PTB) w Braunschweigu (Niemcy) [1, 2]. Wykonane są w technologii planarnej, z wykorzystaniem metody anizotropowego trawienia krzemu oraz technologii nanoszenia cienkich warstw metalicznych. Mają formę chipu krzemowego z trójwarstwową membraną $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ o grubości kilkuset nanometrów. W osi membrany znajduje się bifilarny grzejnik ze stopu $\text{Ni}_{45}\text{Cr}_{50}\text{Si}_5$ charakteryzującego się bardzo małym temperaturowym współczynnikiem rezystancji ($< 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Wzdłuż grzejnika, z obu stron, znajdują się gorące złącza kilkadziesiątu termoelementów połączonych szeregowo. Zarówno grzejnik, jak i termoelementy są wykonane techniką napyłania. Najczęściej stosowane są dwa rodzaje termoelementów: Bi/Sb oraz $\text{CuNi}_{44}/\text{BiSbTe}$. W temperaturze 293 K czułość pojedynczego termoelementu $\text{CuNi}_{44}/\text{BiSbTe}$ jest równa $219 \mu\text{V/K}$, natomiast czułość termoelementu Bi/Sb jest mniejsza ($97 \mu\text{V/K}$). Dlatego czułość PMJTC z termoelementami $\text{CuNi}_{44}/\text{BiSbTe}$ jest dwa razy większa od czułości PMJTC z termoelementami Bi/Sb i jest rzędu $S = 20 \text{ V/W}$. Większa czułość termoelementów pozwala na obniżenie temperatury grzejnika, zmniejszając dzięki temu wartość różnicy transferowej w zakresie częstotliwości poniżej 100 Hz. Inną zaletą termoelementów $\text{CuNi}_{44}/\text{BiSbTe}$ jest duży dodatni współczynnik temperaturowy ich czułości, równy $+3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$. Pozwala to na skompensowanie dodatniego współczynnika temperaturowego konduktancji termicznej, reprezentującej proces odprowadzania ciepła z grzejnika do otoczenia [3]. Prowadzi to do zmniejszenia temperaturowego współczynnika czułości TPWS ($\beta_S = -0,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ dla $\text{CuNi}_{44}/\text{BiSbTe}$; dla porównania $\beta_S = -2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ dla przetwornika z termoelementami Bi/Sb). Dzięki temu w zakresie bardzo małych częstotliwości, w którym temperatura grzejnika nie jest w wystarczający sposób uśredniona, różnica transferowa tego przetwornika jest mniejsza od różnicy transferowej planarnych TPWS z termoelementami Bi/Sb [2].

3. TPWS O LICZALNEJ RÓŻNICY TRANSFEROWEJ

Podstawowym parametrem metrologicznym charakteryzującym TPWS jest różnica transferowa δ , zdefiniowana jako

$$\delta = \frac{U_{ac} - U_{dc}}{U_{dc}} \bigg|_{E_{ac} = \bar{E}_{dc}}, \quad (2)$$

gdzie:

U_{ac} - napięcie przemiennie podane na wejście TPWS;

E_{ac} - napięcie wyjściowe TPWS po podaniu na jego wejście napięcia U_{ac} ;

\bar{E}_{dc} - napięcie wyjściowe średnie TPWS po podaniu na jego wejście $+U_{dc}$, $-U_{ac}$;

U_{dc} - napięcie stałe, dla którego zachodzi

$$\frac{E(+U_{dc}) + E(-U_{dc})}{2} = \bar{E}_{dc} = E_{ac}. \quad (3)$$

W przypadku etalonowych TPWS, przeznaczonych do pracy w zakresie częstotliwości 100 Hz ÷ 1 MHz, różnica transferowa jest obliczana na podstawie znanych parametrów, takich jak właściwości fizykochemiczne materiałów użytych do budowy TPWS, wymiarów geometrycznych, impedancji itp. Obliczenia są wykonywane dla TPWS oraz dla zespołu TPWS-rezystor zakresowy. W przedziale częstotliwości od kilkuset Hz do kilku kHz możliwe jest osiągnięcie standardowej niepewności obliczenia δ rzędu 10^{-7} [4].

Dla częstotliwości niższych od około 100 Hz obliczenie δ z odpowiednio małą niepewnością jest bardzo trudne, ponieważ ze zmniejszaniem się częstotliwości wzrasta wpływ nieliniowych zjawisk transportu ciepła. Opracowane elektrotermiczne modele TPWS umożliwiają obliczenie różnicy transferowej z niepewnością rzędu 10^{-5} [5]. Jest to wartość niewystarczająca. Z tego powodu poszukuje się innych metod wyznaczenia różnicy transferowej etalonowych TPWS.

4. WYZNACZANIE RÓŻNICY TRANSFEROWEJ DROGĄ KOMPARACJI Z PRZETWORNIKIEM WZORCOWYM

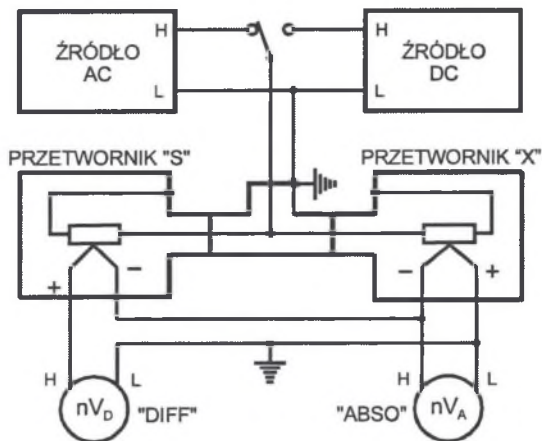
Jeśli dysponuje się TPWS o obliczonej lub zmierzonej różnicy transferowej, to można wykorzystać ten przetwornik do wzorcowania innych TPWS. Pomiar ten jest realizowany metodą transferu ac-dc w układzie komparatora TPWS. Uproszczony schemat takiego układu przedstawiono na rys.1.

We wzorcowaniu biorą udział dwa przetworniki: wzorcowy (S) o znanej różnicy transferowej δ_s oraz wzorcowany (X) o poszukiwanej różnicy transferowej δ_x . Na oba przetworniki podawane jest napięcie przemiennie (ac), a następnie napięcie stałe (dc). W celu zmniejszenia wpływu odwracalnych zjawisk termoelektrycznych w grzejnikach obu przetworników zmienia się polaryzację napięcia stałego. Sekwencje podstawienia ac-dc powtarza się N -krotnie (typowo 10, ..., 12 razy) w celu zwiększenia precyzji wyniku, którym jest wartość średnia $\bar{\delta}_m$ z N podstawień ac-dc $\delta_{m,i}$:

$$\bar{\delta}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{m,i} . \quad (4)$$

Różnicę transferową przetwornika „X” oblicza się ze wzoru:

$$\delta_x = \bar{\delta}_m + \delta_s . \quad (5)$$



Rys. 1. Uproszczony układ komparatora TPWS realizującego napięciowy transfer ac-dc
Fig. 1. Simplified configuration of the TVC comparator performing voltage ac-dc transfer

Metoda komparacji przetworników umożliwia utworzenie zestawu TPWS pokrywających szeroki zakres napięcia od około 0,5 V do 1000 V. W tym przypadku porównuje się wzorcowy przetwornik z przetwornikiem wzorcowym o wyższym lub niższym napięciu znamionowym. Metoda ta jest stosowana przy częstotliwościach wyższych od kilkuset Hz, gdyż wówczas różnica transferowa TPWS jest niemal niezależna od mocy wydzielanej w jego grzejniku. Ilustruje to tabela 1, zawierająca wybrane wartości różnicy transferowej wzorca roboczego PTB o oznaczeniu AN-5. Składa się on z PMJTC o rezystancji grzejnika równej 100 Ω oraz rezystora zakresowego 400 Ω .

W praktyce stosunek napięć znamionowych komparowanych przetworników nie przekracza 1:2 dla TPWS jednozłączowych lub 1:3 dla przetworników wielozłączowych. W przypadku, gdy propagacja różnicy transferowej odbywa się w kierunku od wzorca o niższym napięciu znamionowym w kierunku TPWS o wyższym napięciu znamionowym, procedura ta nosi nazwę wstępującej (ang. *step-up*). Jeśli propagacja odbywa się w przeciwnym kierunku – określa się ją mianem zstępującej (ang. *step-down*) [6].

Tabela 1

Różnica transferowa PMJTC o napięciu nominalnym 5 V
w funkcji częstotliwości i napięcia (w $\mu\text{V/V}$)

U V	10 Hz	20 Hz	1 kHz
2	0,8	0,1	0,2
3	1,8	0,3	0,2
4	3,2	0,5	0,2
5	5,0	0,8	0,2
6	7,2	1,2	0,2

5. WZORCOWANIE TPWS Z WYKORZYSTANIEM JAKO WZORCA PMJTC O ZREDUKOWANEJ MOCY WYDZIELANEJ W GRZEJNIKU

Dla częstotliwości mniejszych od 100 Hz procedury step-up i step-down nie zapewniają takiej dokładności, jak przy większych częstotliwościach. Przyczyną jest zależność δ od mocy wydzielanej w grzejniku, co widać z danych zamieszczonych w tabeli 1. Jest to efekt wpływu nieliniowych zjawisk transportu ciepła, który uwidacznia się przy niewystarczającym uśrednieniu temperatury zespołu grzejnik-termoelementy.

Z danych zamieszczonych w tabeli 1 wynika, że δ zmniejsza się proporcjonalnie do mocy wydzielanej w grzejniku przetwornika:

$$\delta(P) = \frac{P}{P_N} \delta(P_N) \quad (6)$$

gdzie:

$\delta(P)$ jest różnicą transferową dla mocy P wydzielanej w grzejniku, $\delta(P_N)$ jest różnicą transferową dla mocy P_N odpowiadającej napięciu znamionowemu przetwornika U_N .

Wprowadzając pojęcie współczynnika redukcji mocy p :

$$p = \frac{P_N}{P} = \left(\frac{U_N}{U} \right)^2, \quad (7)$$

określić można wzór na różnicę transferową w sposób następujący:

$$\delta(p) = \frac{\delta(P_N)}{p} \quad (8)$$

Zatem gdy p jest odpowiednio duże, to dla PMJTC o małej wartości $\delta(P_N)$ różnica transferowa $\delta(p)$ staje się bardzo mała. Umożliwia to wykorzystanie PMJTC o niedokładnie określonej, ale odpowiednio małej różnicy transferowej δ , jako wzorca. Najprościej wykorzystać wzorzec o odpowiednio wyższym napięciu znamionowym, który dla mocy P_N odpowiadającej napięciu

znamionowemu U_N charakteryzuje się różnicą transferową δ_s . Po dokonaniu komparacji w układzie przedstawionym na rysunku 1 różnicę transferową δ_x wzorcowanego przetwornika oblicza się z zależności

$$\delta_x = \bar{\delta}_m + \frac{\delta_s}{p} . \quad (9)$$

6. BŁĄD I NIEPEWNOŚĆ WZORCOWANIA METODY WYKORZYSTUJĄCEJ W CHARAKTERZE WZORCA PMJTC O ZREDUKOWANEJ MOCY WYDZIELANEJ W GRZEJNIKU

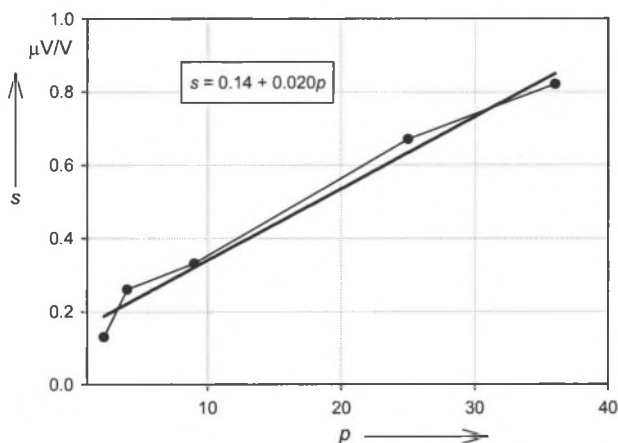
Błąd systematyczny opisywanej metody zmniejsza się ze wzrostem p . Niestety, wzrost p powoduje zmniejszanie się napięcia wyjściowego E TPWS, zgodnie z zależnością

$$E = \frac{E_N}{p} , \quad (10)$$

gdzie:

E_N jest napięciem wyjściowym TPWS, odpowiadającym znamionowemu napięciu wejściowemu U_N przetwornika. Napięcie to jest mierzone za pomocą nanowoltomierza napięcia stałego o dużej rozdzielczości (6...7 cyfr). Zmniejszenie napięcia wyjściowego TPWS powoduje wzrost niepewności typu A określenia różnicy transferowej, co jest wynikiem oddziaływania zakłóceń, szumów i dryftów. W praktyce transfer ac-dc można jeszcze realizować dla napięcia wyjściowego TPWS rzędu 1 mV. Oznacza to, że omawiana metoda nie nadaje się do wzorcowania jednozłączowych TPWS, dla których napięcie wyjściowe E_N nie przekracza 10 mV.

Inaczej jest w przypadku wielozłączowych PMJTC opisanych w p.2. Szeregowe połączenie kilkudziesięciu termoelementów o dużej czułości pozwala na uzyskanie dużego napięcia wyjściowego, o wartości sięgającej 300 mV przy nominalnym napięciu podanym na grzejnik. Dzięki temu rozpiętość napięcia wejściowego przetwornika jest bardzo duża. Wynika stąd rozpiętość napięć wyjściowych rzędu 300:1, odpowiadająca rozpiętości napięć wejściowych 17:1. Dla porównania rozpiętość napięcia wejściowego jednozłączowego TPWS jest rzędu 3:1. Na rysunku 2 przedstawiono zależność odchylenia standardowego wyników serii 12 podstawień ac-dc od współczynnika redukcji mocy p . Charakterystykę wyznaczono w układzie komparatora przetworników wartości skutecznej (rys.1) przy napięciu U nie przekraczającym 5 V i częstotliwości 10 Hz. Jako wzorzec wykorzystano opisany wcześniej przetwornik AN-5. Odchylenie standardowe niemal liniowo wzrasta ze wzrostem współczynnika redukcji mocy. W praktyce nie stosuje się wartości p mniejszych od około 25, co odpowiada pięciokrotnie wyższemu napięciu znamionowemu przetwornika zastosowanego jako wzorzec.



Rys. 2. Zależność odchylenia standardowego s dla serii 12 wyników podstawień ac-dc od współczynnika redukcji mocy p dla napięcia $U \leq 5$ V

Fig. 2. Standard deviation s of 12 ac-dc difference measurements vs. power reduction coefficient p for the voltage range $U \leq 5$ V

Ponieważ w przedziale częstotliwości 10, ..., 100 Hz różnica transferowa PMJTC nie przekracza $1 \cdot 10^{-5}$ $\mu\text{V/V}$ [2, 3], to dla $p = 16, \dots, 25$ możliwe jest osiągnięcie błędu systematycznego porównywalnego z odchyleniem standardowym serii wyników N podstawień ac-dc.

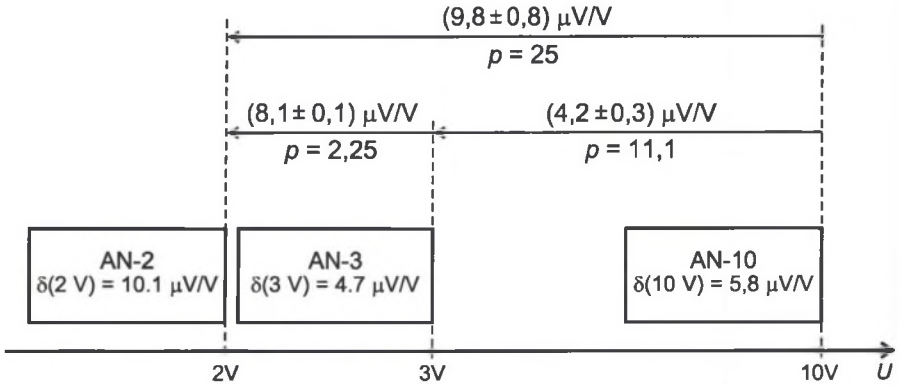
Standardowa niepewność $u(\delta_x)$ wyznaczonej różnicy transferowej jest równa

$$u(\delta_x) = \sqrt{\frac{s^2}{N} + u^2\left(\frac{\delta_s}{p}\right) + u_T^2}, \quad (11)$$

gdzie s jest odchyleniem standardowym serii wyników N podstawień ac-dc, $u^2\left(\frac{\delta_s}{p}\right)$ jest standardową niepewnością różnicy transferowej wzorca przy zredukowanej mocy wydzielanej w grzejniku przetwornika, u_T^2 jest niepewnością wyznaczenia $\delta_{m,d}$ i zdeterminowana jest właściwościami systemu pomiarowego. Pierwsza z podanych niepewności ma charakter niepewności typu A, dwie pozostałe są typu B.

7. DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA METODY

Na rysunku 3 przedstawiono wynik wzorcowania przetwornika o napięciu znamionowym równym 2 V, oznaczonego przez AN-2, przy wykorzystaniu przetworników o napięciach znamionowych 3 V (AN-3) i 10 V (AN-10). Przetworniki te są wzorcami roboczymi w Laboratorium Transferów AC-DC Federalnego Instytutu Fizyko-Technicznego (PTB) w Braunschweigu (Niemcy).



Rys. 3. Wynik wzorcowania przetworników przy częstotliwości 10 Hz i napięciach $U = 2$ V oraz 3 V
 Fig. 3. Result of thermal converter calibration at frequency 10 Hz and voltage $U = 2$ V and 3 V

Pomiar został zrealizowany w systemie pomiarowym realizującym transfer ac-dc, o schemacie przedstawionym na rys.1 przy najmniejszej, stosowanej w typowych pomiarach ac-dc częstotliwości 10 Hz, przy której różnice transferowe przetworników są największe (tabela 1). Wartość różnicy transferowej wzorca AN-10 została zdeterminowana metodą komparacji z przetwornikami o zredukowanej mocy wydzielanej w grzejniku. Wzorcami w tym pomiarze były przetworniki AN-30 oraz AN-50 o napięciach znamionowych odpowiednio 30 V i 50 V. Wzorce wykorzystano przy współczynnikach redukcji mocy p równych odpowiednio 9 oraz 25. Na rysunku zamieszczono także niepewności standardowe typu A serii 12 podstawień ac-dc.

Obliczona ze wzoru (9) wartość różnicy transferowej przetwornika AN-3, określona względem wzorca AN-10 przy napięciu 3 V, jest równa

$$\delta_{AN3}(3V) = 4,2 + \frac{5,8}{11,1} = 4,7 \mu V / V . \quad (12)$$

Wartość różnicy transferowej przetwornika AN-2, określona względem wzorca AN-3 przy napięciu 2 V, jest równa

$$\delta_{AN2}(2V) = 8,1 + \frac{4,7}{2,25} = 10,2 \mu V / V . \quad (13)$$

Z kolei wartość różnicy transferowej przetwornika AN-2 określona względem wzorca AN-10 przy napięciu 2 V, jest równa

$$\delta'_{AN2}(2V) = 9,8 + \frac{5,8}{25} = 10,0 \mu V / V . \quad (14)$$

Różnica pomiędzy wartościami otrzymanymi ze wzorów (13) i (14) jest równa $0,2 \mu V / V$. Wartość ta jest mniejsza od standardowej niepewności typu A wyznaczenia $\delta'_{AN2}(2V)$.

8. WNIOSKI

Przedstawiona metoda umożliwia wzorcowanie termicznych przetworników wartości skutecznej bez potrzeby stosowania procedur step-up lub step-down, które w zakresie częstotliwości poniżej kilkadziesiąt Hz nie zapewniają wystarczającej dokładności. Metoda nie wymaga także przetwornika wzorcowego o różnicy transferowej obliczonej z dużą dokładnością. Wystarczy, aby parametr ten był odpowiednio mały ($<1 \cdot 10^{-5} \mu\text{V/V}$) oraz aby przetwornik wzorcowy charakteryzował się dużą czułością. Z tego powodu opisany sposób nadaje się do wzorcowania planarnych termicznych przetworników wartości skutecznej. Metoda umożliwia utworzenie etalonu napięcia przemiennego dla napięć z przedziału 0,5, ..., 1000 V i częstotliwości 10, ..., 100 Hz.

LITERATURA

1. Klonz M., Laiz H., Kessler E.: *Development of Thin-Film Multijunction Thermal Converters at PTB/IPHT*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.50, No.6, December 2001, pp. 1490-1498.
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., vol.52, No.2, April 2003, pp. 350-354.
3. Kampik M.: *Thermal converter with piezoacousticsensor for AC-DC transfer*, Gnome Books, Katowice 2000.
4. Klonz M.: *Entwicklung von Vielfachtermokonvertern zur genauen Rueckfuehrung von Wechselgroessen auf aequivalente Gleichgroessen*, Ph.D. thesis, Tech. Univ. Braunschweig, Braunschweig, Germany 1987.
5. Laiz H., Klonz M.: *A Simulation Tool for the AC-DC Transfer Difference of Thermal Converters at Low Frequencies*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.48, No.6, December 1999, pp. 1155-1160.
6. Hermach F.L., Williams E.S.: *Thermal Converters for Audio-Frequency Voltage Measurements of High Accuracy*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.IM-15, No.4, December 1966, pp. 260-268.

Abstract

The paper presents a method of calibration of thermal converters (TC) that are used as ac voltage standards. The method is useful for calibration of TCs in 0,5, ..., 1000 V voltage range at frequencies between 10 and 100 Hz. The calibration method is based on comparison of the thermal converter to be calibrated with the standard TC with reduced power developed in its heater. The calibration is performed in the ac-dc transfer measuring system configured as TC comparator working in the differential mode. The method does not require a standard TC with accurately calculated ac-dc transfer difference. It is sufficient, when this parameter is small enough ($<1 \cdot 10^{-5} \mu\text{V/V}$) and the sensitivity of the standard TC is high. These conditions fulfill planar multijunction thermal converters (PMJTC). Section 1 presents a short overview of different types of thermal converters. In the section 2 the design and technology of planar multijunction thermal converters (PMJTC) are described. Then basic metrological parameters of TC are introduced and two classic methods of TC calibration are briefly presented. This part also contains basic principles of ac-dc transfer measurement system used for calibration of thermal converters as well as its basic equations. Then the simplified method of calibration is introduced. It is followed by the short description of its limitations. The experimental verification is