

Michał GRZENIK, Marian KAMPIK

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI,
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Przegląd metod minimalizacji różnicy transferowej termicznych planarnych wielozłączowych przetworników wartości skutecznej w paśmie częstotliwości 10 kHz – 1 MHz

Mgr inż. Michał GRZENIK

Ukończył studia na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w 2010 roku. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie w Instytucie Metrologii Elektroniki i Automatyki. Jego zainteresowania naukowe obejmują dokładne pomiary wielkości elektrycznych oraz źródła błędów występujące w termicznych przetwornikach wartości skutecznej.



e-mail: michal.grzenik@polsl.pl

Dr hab. inż. Marian KAMPIK

Profesor nadzwyczajny w Instytucie Metrologii Elektroniki i Automatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej, Autor lub współautor ponad 100 publikacji naukowo-technicznych, w tym trzech monografii. Jego zainteresowania naukowe obejmują dokładne pomiary wielkości elektrycznych, sensorykę oraz zagadnienia związane z cyfrową syntezą sygnałów pomiarowych.



e-mail: marian.kampik@polsl.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metody minimalizacji różnicy transferowej planarnych wielozłączowych przetworników termicznych, wykorzystywanych jako wzorce napięcia przemiennego w paśmie częstotliwości 10 kHz - 1 MHz. Praca ma charakter przeglądowy i zawiera wyniki badań przeprowadzonych na przestrzeni ostatniej dekady w PTB oraz NIST.

Słowa kluczowe: termiczny przetwornik wartości skutecznej, wzorzec napięcia przemiennego, wartość skuteczna.

Review of methods for minimizing the AC-DC difference of planar multijunction thermal converters in the frequency range 10 kHz - 1 MHz

Abstract

The most accurate way of determining AC voltage is still an AC - DC transfer realized with a thermal voltage converter (TVC). This is the reason why, at present, most AC voltage standards are based on TVCs of different technology and design. Many National Measurement Institutes (NMI) make use of planar multijunction thermal converters (PMJTC) as AC voltage standards. The paper presents methods of reduction the AC - DC transfer difference of the PMJTCs in the frequency range from 10 kHz to 1 MHz. The work is a review and presents the results of studies conducted over the last ten years by researchers at Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Germany and the National Institute of Standards and Technology (NIST), USA. It shows the impact of this research on the design of the PMJTCs. The paper is focused on the following main issues: searching for a better material with lower dielectric loss for a PMJTC membrane, optimization of the PMJTC heater geometry and its bonding pads and integration of the PMJTC with a Tee-connector. The paper presents also the effort which was put into creating more sensitive PMJTC thermocouples and reduction of the impact of reversible thermoelectric effects in a PMJTC heater by using materials with the lower Thomson coefficient.

Keywords: thermal voltage converter, AC voltage standard, effective value.

1. Wstęp

Obecnie najdokładniejszą metodą pomiaru wartości skutecznej napięcia przemiennego w paśmie częstotliwości 10 kHz – 1 MHz jest metoda transferu AC-DC, w której wykorzystuje się termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS).

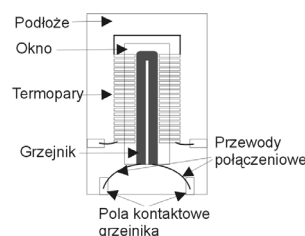
Jednym z kryteriów podziału współczesnych TPWS jest liczba zastosowanych w przetworniku złączy termoelektrycznych. Najbardziej znane są TPWS zawierające pojedyncze złącze termoelektryczne, zwane jednozłączowymi (ang. *Single Junction Thermal Converter*, SJTC). Ich dużą zaletą jest relatywnie prosta konstrukcja. Charakteryzują się one dobrymi parametrami metrologicznymi w szerokim zakresie częstotliwości. Współcześnie nadal wykorzystuje się te przetworniki we wzorcowych transferach AC-DC.

Niestety zastosowanie w przetworniku pojedynczego złącza powoduje powstanie błędów spowodowanego odwracalnymi zjawiskami termoelektrycznymi Thomsona i Peltiera [1]. Wadą przetworników jednozłączowych jest także relatywnie małe napięcie wyjściowe (< 8 mV), które musi być mierzone z odpowiednio dużą rozdzielczością, rzędu 6 – 8 cyfr znaczących. W niektórych sytuacjach rzeczywista rozdzielczość pomiaru tego napięcia jest niewystarczająca dla uzyskania odpowiedniej dokładności transferu AC-DC [2]. Dlatego tam, gdzie jest to możliwe, przetworniki jednozłączowe są obecnie zastępowane przez wielozłączowe termiczne przetworniki wartości skutecznej (ang. *Multijunction Thermal Converter*, MJTC). W przetwornikach wielozłączowych wykorzystuje się od kilkudziesięciu do ponad stu złączy termoelektrycznych połączonych szeregowo. Dzięki dużej liczbie złączy termoelektrycznych nominalne napięcie wyjściowe przetworników wielozłączowych jest rzędu 100 mV.

W niniejszym artykule zaprezentowano metody minimalizacji wpływu zjawisk, powodujących wzrost różnicy transferowej planarnych wielozłączowych przetworników wartości skutecznej w stronę dodatnich lub ujemnych wartości, ujawniających się w paśmie częstotliwości od około 10 kHz do 1 MHz. Praca ma charakter przeglądowy i zawiera wyniki badań, przeprowadzonych na przestrzeni ostatnich lat w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, Niemcy) oraz National Institute of Standards and Technology (NIST, USA).

2. Planarne wielozłączowe TPWS

Początkowo wielozłączowe termiczne przetworniki nie były zbyt popularne, gdyż ich skomplikowana konstrukcja powodowała problemy z masową produkcją. W 1988 w PTB opracowano planarny termiczny wielozłączowy TPWS (ang. *Planar Multijunction Thermal Converter*, PMJTC) [1]. Przetwornik ten został wykonany przy wykorzystaniu powtarzalnej technologii anizotropowego trawienia krzemu oraz technologii cienkich warstw. Konstrukcję takiego przetwornika przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Budowa planarnego wielozłączowego przetwornika termicznego opracowanego w PTB [1]

Fig. 1. Construction of the Planar Multijunction Thermal Converter designed in PTB [1]

Prototypowy PMJTC, opracowany w PTB, zawierał 108 złączy termoelektrycznych, umieszczonych wzdłuż obu stron bifilarnego grzejnika umieszczonego na cienkiej (o grubości rzędu 1 μm) membranie wykonanej z SiO_2 [1]. Membrana ta charakteryzowała się małym współczynnikiem przewodzenia ciepła. Wykonano ją metodą anizotropowego trawienia podłoża krzemowego, na którego obie powierzchnie naniesiono cienkie warstwy SiO_2 . W późniejszych rozwiązaniach, w celu zwiększenia wytrzymałości termomechanicznej, membrany SiO_2 zastąpiono trójwarstwowymi membranami $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ [3].

Początkowo złącza termoelektryczne PMJTC wykonywano z CuNi44-Cu . Później zastąpiono je złączami Bi-Sb o około trzykrotnie większym współczynnikiem Seebecka. Przetworniki wykorzystujące złącza CuNi44-Cu charakteryzowały się czułością w powietrzu równą 3-5 V/W. Dla złączy Bi-Sb uzyskana czułość w powietrzu wynosi 16 V/W. Korzystną cechą złączy Bi-Sb jest ich mniejsza przewodność cieplna [3], co przyczynia się do zwiększenia czułości TPWS. W 2003 roku opracowano PMJTC ze złączami termoelektrycznymi CuNi44/BiSbTe , które umożliwiają osiągnięcie około dwukrotnie większej czułości w porównaniu z PMJTC ze złączami BiSb [4].

3. Zależność różnicy transferowej PMJTC od częstotliwości

Podstawowym parametrem metrologicznym TPWS, jest różnica transferowa, charakteryzująca błąd powstający podczas przetwarzania wartości skutecznej napięcia przemiennego na odpowiadającą jej wartość napięcia stałego. Jest ona zdefiniowana wzorem:

$$\delta_U = \frac{U_{AC} - U_{DC}}{U_{DC}} \Big|_{E_{AC}=E_{DC}}, \quad (1)$$

gdzie U_{AC} i U_{DC} są, odpowiednio, napięciem przemiennym i stałym, podanym na wejście TPWS, a E_{AC} i E_{DC} są napięciami wyjściowymi, odpowiadającymi U_{AC} i U_{DC} .

Na wartość różnicy transferowej TPWS ma wpływ wiele czynników, takich jak na przykład nieliniowość zjawisk transportu ciepła z grzejnika do otoczenia, odwracalne zjawiska termoelektryczne, czy parametry resztkowe grzejnika TPWS. Wpływ niektórych z powyższych zjawisk zależy od częstotliwości prądu płynącego przez grzejnik, a ich skutki mogą się wzajemnie zniżyć w określonych przedziałach częstotliwości. Można wykorzystać ten efekt do minimalizacji różnicy transferowej przetwornika.

Biorąc pod uwagę wpływ różnego rodzaju zjawisk na wartość różnicy transferowej, zakres częstotliwości, w których realizowany jest transfer AC-DC z TPWS można podzielić na trzy podzakresy:

- 1) od 10 Hz do około 100 Hz,
- 2) od około 100 Hz do około 10 kHz,
- 3) od około 10 kHz do 1 MHz.

W paśmie częstotliwości 10 Hz - 100 Hz różnica transferowa zdeterminowana jest przede wszystkim nieliniowymi zjawiskami transportu ciepła od zespołu grzejnik-złącza termoelektryczne do otoczenia [5].

W paśmie częstotliwości od około 100 Hz do około 10 kHz różnica transferowa TPWS jest spowodowana głównie zjawiskami termoelektrycznymi w grzejniku. W przypadku TPWS z grzejnikami o kształcie bifilarnym, wpływ tych zjawisk jest mały, a różnica transferowa osiąga bardzo małą wartość, rzędu 0,1 $\mu\text{V/V}$.

W paśmie częstotliwości od około 10 kHz do 1 MHz obserwowany jest, wzrastający z częstotliwością, wpływ parametrów resztkowych grzejnika na wartość różnicy transferowej. Dominują dwa zjawiska: zjawisko naskórkowości w grzejniku, które jest odpowiedzialne za wzrost różnicy transferowej, oraz straty dielektryczne w materiale membrany oraz podłoża w obszarze pod polami kontaktowymi i doprowadzeniami grzejnika. To ostatnie

zjawisko jest przyczyną wzrostu różnicy transferowej w stronę wartości ujemnych.

4. Wpływ materiału podłoża i membrany na różnicę transferową PMJTC

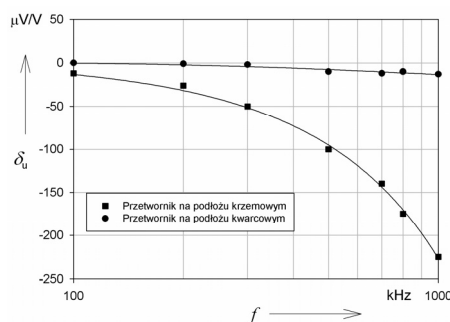
Większość produkowanych współcześnie PMJTC wykonywana jest na podłożu krzemowym. W przetwornikach tych, przy zwiększaniu częstotliwości napięcia wejściowego, można zaobserwować wzrost modułu różnicy transferowej. Zależność ta jest szczególnie krytyczna w zakresie częstotliwości powyżej 100 kHz. Ponieważ jedną z przyczyn tej zależności są straty dielektryczne w materiale podłoża, podejmowane są próby zastosowania w PMJTC podłoża i membrany z innych materiałów, takich jak na przykład kwarc czy topiona krzemionka. Wybrane właściwości tych materiałów przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wybrane właściwości materiałów stosowanych na membrany podłoża PMJTC [6, 7]

Tab. 1. Selected parameters of materials used for PMJTC substrate membranes [6, 7]

Material	Skład	ϵ_r	$\text{tg}\delta$
Krzem	Si	11,8	$\approx 5 \cdot 10^{-3}$
Membrana typowego PMJTC	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$	$\approx 3,8$	$6 \cdot 10^{-3}$
Kwarc	krystaliczny SiO_2	4,5	$8 \cdot 10^{-4}$
Krzemionka topiona	99,9% SiO_2	3,8	$\approx 2 \cdot 10^{-5}$

Podłoża z kwarcu krystalicznego czy z krzemionki topionej charakteryzują się mniejszą przenikalnością elektryczną niż krzem. Dzięki temu pojemności, występujące w schemacie zastępczym obwodu grzejnika PMJTC, są mniejsze, a to poprawia parametry metrologiczne przetworników w zakresie wyższych częstotliwości. Niestety przewodność cieplna kwarcu jest siedmiokrotnie mniejsza od przewodności cieplnej krzemu, co pogarsza proces oddawania ciepła do otoczenia przez „zimne” końce złączy termoelektrycznych [8]. Niemniej dzięki zastosowaniu podłoża i membrany z kwarcu w PMJTC dla częstotliwości powyżej 100 kHz różnica transferowa przetwornika jest o około rząd mniejsza niż dla PMJTC na podłożu krzemowym [6]. Na rys.2 przedstawiono zależność różnicy transferowej od częstotliwości dla obu przetworników.



Rys. 2. Porównanie różnicy transferowej PMJTC z membraną $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ na podłożu z krzemu oraz wykonanego z kwarcu [8]

Fig. 2. Comparison of the ac-dc transfer difference of the PMJTC with a $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ sandwich membrane on a silicon chip and a PMJTC made of quartz [8]

Podstawowym problemem, występującym w procesie produkcyjnym kwarcowych PMJTC, jest trudność uzyskania wystarczająco cienkich membran. Przetwornik o grubej membranie charakteryzuje się gorszą czułością. W PMJTC wykonanym na podłożu krzemowym grubość membrany jest równa około 600 nm [3]. Dla porównania membrany kwarcowych PMJTC mają grubość około 40 μm [9]. Mimo to są bardzo krucho, i często ulegają uszkodzeniu w fazie nanoszenia złączy termoelektrycznych. Z tego powodu kwarcowe PMJTC są wciąż trudno dostępne.

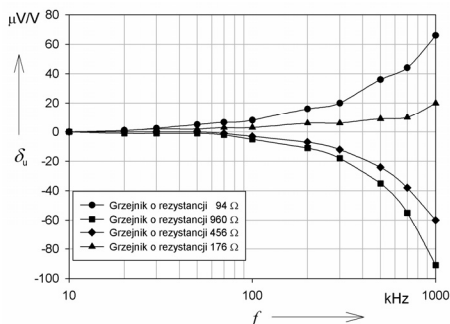
Podejmuje się również próby zbudowania przetworników z podłożem wykonanym z topionej krzemionki (ang. *fused silica*). Materiał ten posiada podobną przenikalność elektryczną ($\epsilon_r = 3,8$) jak kwarc ($\epsilon_r = 4,5$) lecz jest bardziej od niego wytrzymały mechanicznie. Dzięki temu możliwe jest wytworzenie w tym materiale nieco cieńszych membran niż w przypadku kwarcowych przetworników (około $25 \mu\text{m}$), charakteryzujących się mniejszą przewodnością cieplną. Membrany te wykonywane są metodą obróbki mechanicznej (mikropiaskowania) [9]. Prace nad zbudowaniem tego rodzaju przetworników są obecnie prowadzone w NIST. Z uwagi na niewielkie wartości rezystancji grzejników prototypowe przetworniki na podłożu z topionej krzemionki charakteryzują się relatywnie dużą różnicą transferową. Jednak wyniki przeprowadzonych symulacji wykazują, iż możliwe jest uzyskanie bardzo korzystnych właściwości metrologicznych w zakresie częstotliwości powyżej 100 kHz [9].

5. Dobór materiału i rezystancji grzejnika

Oprócz podłoża duży wpływ na różnicę transferową ma technologia wykonania grzejnika PMJTC. Musi on być wykonany z materiału o małym temperaturowym współczynniku rezystancji oraz małych wartościach współczynników Thomsona oraz Peltiera. Zjawiska Thomsona oraz Peltiera powodują niejednakowy rozkład temperatury grzejnika przy zmianie polaryzacji płynącego przez grzejnik prądu stałego. Zjawisko to jest szczególnie krytyczne dla grzejników niebifilarnych i z tego powodu większość PMJTC posiada grzejnik o kształcie bifilarnym.

Początkowo grzejniki były wykonywane z konstantanu (Cu-Ni44). Materiał ten jednak charakteryzuje się wysokim współczynnikiem Thomsona [10], dlatego obecnie w przetwornikach wykorzystywany jest stop nichromowy, składający się z 45% Ni, 50% Cr oraz 5% Si. Po naniesieniu na podłoże grzejnik nichromowy charakteryzuje się temperaturowym współczynnikiem rezystancji α_H równym około $-50 \mu\Omega/\Omega$. Aby zmniejszyć $|\alpha_H|$, przetwornik z napylnym grzejnikiem jest poddawany obróbce termicznej, po której $|\alpha_H| < 1 \mu\Omega/\Omega$ [3].

Stop nichromowy umożliwia tworzenie grzejników o rezystancji z przedziału od kilkudziesięciu do kilkuset Ω . Wartość rezystancji grzejnika ma duży wpływ na wartość różnicy transferowej. W przypadku bardzo małych wartości rezystancji (poniżej 200Ω) obserwuje się znacznie większą różnicę transferową niż w przypadku przetworników o większej rezystancji grzejnika.



Rys. 3. Zmierzona różnica transferowa δ_u dla czterech przetworników PMJTC wykonanych na podłożu z krzemu z membraną $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ bez obelisku pod grzejnikiem [11]

Fig. 3. The measured ac-dc difference δ_u for four PMJTCs with $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ sandwich membrane on a silicon chip without obelisk [11]

Na przykład przetwornik o rezystancji grzejnika 20Ω przy częstotliwości sygnału 1 MHz posiada około 10 razy większą różnicę transferową niż przetwornik z grzejnikiem o rezystancji 200Ω [10]. W grzejniku przetwornika o małej rezystancji dominuje efekt naskórkowy w przewodach oraz złączu, powodujący wzrost różnicy transferowej wraz z wzrostem częstotliwości [3]. Ze wzrostem rezystancji grzejnika wpływ zjawiska naskórkowości jest kompensowany stratami dielektrycznymi w membranie i podłożu, co

objawia się zmniejszaniem różnicy transferowej (zwiększaniem w kierunku ujemnych wartości). Z przeprowadzonych badań wynika, że efekt ten jest spowodowany przede wszystkim wpływem pojemności i stratności kondensatora, jaki powstaje między polami kontaktowymi grzejnika oraz stratami dielektrycznymi w membranie [3].

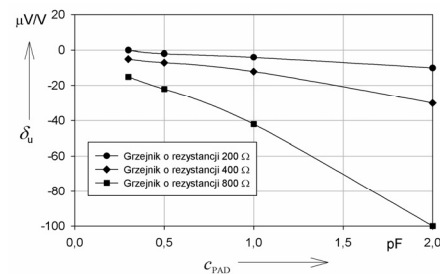
Optymalna wartość rezystancji grzejnika zależy od materiału membrany i podłoża oraz od geometrii grzejnika. Przykładowa zależność różnicy transferowej od częstotliwości dla czterech przetworników PMJTC wykonanych na podłożu z krzemu (bez tzw. obelisku pod grzejnikiem) jest przedstawiona na rys. 3.

6. Optymalizacja geometrii doprowadzeń grzejnika

Przy relatywnie dużej rezystancji grzejnika dla częstotliwości powyżej 100 kHz różnica transferowa PMJTC na podłożu krzemowym ma wartość ujemną, zwiększającą swoją wartość bezwzględną ze wzrostem rezystancji grzejnika. Dla bifilarnego grzejnika wartość różnicy transferowej [11]:

- nie zależy od napięcia podanego na grzejnik przetwornika,
- silnie zależy od rezystancji grzejnika,
- wzrasta wprost proporcjonalnie do kwadratu częstotliwości.

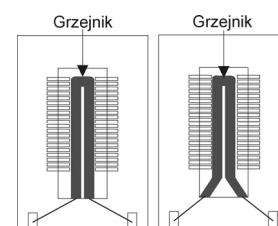
Badania wykazały również wpływ pojemności C_{PAD} , występującej pomiędzy polami kontaktowymi grzejnika. Zmierzona pojemność pomiędzy polami w prototypowej wersji przetwornika wynosiła około 2 pF . Na wartość tej pojemności ma wpływ powierzchnia pól kontaktowych oraz ich wzajemne rozmieszczenie względem siebie. Wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiono na rys. 4 [11].



Rys. 4. Obliczona zależność różnicy transferowej PMJTC na podłożu krzemowym od pojemności między polami kontaktowymi C_{PAD} przy częstotliwości 1 MHz [11]

Fig. 4. The calculated relation between the ac-dc difference of the PMJTC on a silicon substrate and the capacitance C_{PAD} between bonding pads at 1 MHz [11]

Z rys. 4 wynika konieczność zmniejszenia wartości pojemności pomiędzy polami połączeniowymi grzejnika. Ponieważ pola te mają minimalne rozmiary, skupiono się na ich maksymalnym rozsunięciu względem siebie. Wcześniejsza oraz zmodyfikowana geometria pól kontaktowych grzejnika przedstawiona jest na rys. 5. Geometria przedstawiona na rys.5b umożliwia zmniejszenie pojemności pomiędzy polami kontaktowymi do około $0,07 \text{ pF}$. Symulacje wykazały ponad 50% zmniejszenie wpływu pojemności pomiędzy polami kontaktowymi grzejnika na różnicę transferową [11].



Rys. 5. Geometria pól kontaktowych grzejnika PMJTC: a) przed, b) po modyfikacji [11]

Fig. 5. Geometry of the PMJTC bonding pads: a) before, b) after modification [11]

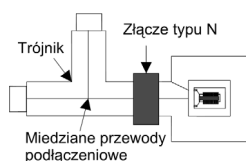
Alternatywnym sposobem zmniejszenia wpływu pojemności C_{PAD} na różnicę transferową jest zastosowanie podłoża o mniejszej przenikalności elektrycznej (np. z kwarcu lub z topionej krzemionki).

7. Integracja przetwornika z trójnikiem

Realizowanie transferu AC-DC przy częstotliwości większej od 10 kHz ujawnia wpływ zjawisk które przy niższych częstotliwościach nie są z reguły brane pod uwagę. Z przeprowadzonych badań wynika, że na wynik transferu wpływają między innymi impedancje:

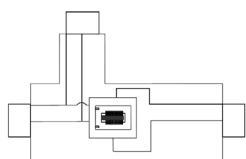
- 1) przewodów łączących pola kontaktowe grzejnika z podłożem nośnym (ang. *carrier*),
- 2) przewodów łączących podłoże nośne ze złączem współosiowym,
- 3) przewodów w trójniku.

Na rys.6 przedstawiono uproszczony schemat przetwornika we współosiowej obudowie, połączonego z trójnikiem za pomocą złącza współosiowego typu N.



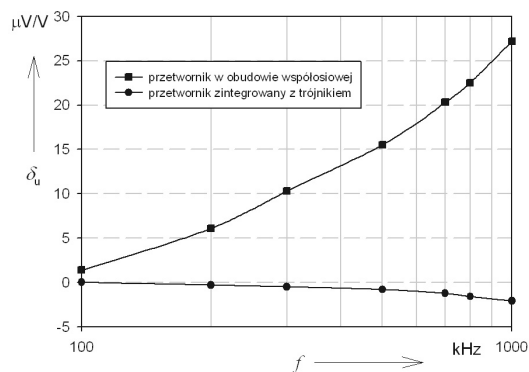
Rys. 6. Typowy sposób połączenia PMJTC z trójnikiem
Fig. 6. Typical connection between the PMJTC and the Tee

Zintegrowanie TPWS z trójnikiem powoduje iż, w zależności od częstotliwości, różnica transferowa zmniejsza się od 3 do ponad 10 razy [12]. Na rys.7 przedstawiono widok takiego przetwornika [8].



Rys. 7. Przetwornik umieszczony wewnątrz trójnika [8]
Fig. 7. PMJTC inside the Tee [8]

Na rys. 8 przedstawiono wyniki symulacji, których celem było zbadanie wpływu zintegrowania TPWS z trójnikiem na różnicę transferową. Przeprowadzono je dla PMJTC na podłożu kwarcowym [13].



Rys. 8. Obliczona wartość różnicy transferowej kwarcowego PMJTC z grzejnikiem o rezystancji 240 Ω wbudowanego w trójnik oraz w zwykłej obudowie [13]
Fig. 8. The calculated ac-dc difference of the quartz PMJTC with a 240 Ω heater in the housing with the built-in Tee and in the standard housing with N-connector [13]

8. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metody minimalizacji różnicy transferowej w planarnych wielozłączowych przetwornikach termicznych w paśmie częstotliwości 10 kHz - 1 MHz. Metody te obejmują poszukiwanie nowych materiałów na podłoża i membrany przetworników, dobór materiału i rezystancji grzejnika, poszukiwanie optymalnego kształtu grzejnika, jego doprowadzeń i pól kontaktowych oraz integrowanie przetwornika z trójnikiem.

9. Literatura

- [1] Klonz, M., Weimann T.: Accurate thin film multijunction thermal converter on a silicon chip, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, Vol. 38, Issue 2, p. 335 – 337, 1989.
- [2] Jin-Sup Kim, Hyun-Cheol Lee, Jong-Hyun Lee, Jung-Hee Lee, Se Il Park, Sung-Won Kwon: A planar Bi-Sb multijunction thermal converter with small ac-dc transfer differences, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, Vol. 51, Issue 1, p. 115 - 119, February 2002.
- [3] Klonz M., Laiz H., Kessler E.: Development of thin-film multijunction thermal converters at PTB/IPHT, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, Vol. 50, Issue 6, p. 1490 – 1498, December 2001.
- [4] 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, p. 350-354.
- [5] Laiz, H., Klonz, M., Kessler, E., Spiegel T.: New thin-film multijunction thermal converters with negligible low frequency AC-DC transfer differences, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, Vol. 50, Issue 2, p. 333 – 337, April 2001.
- [6] Scarioni L., Klonz M., Laiz H., Kampik, M.: High-frequency thin-film multijunction thermal converter on a quartz crystal chip, *Precision Electromagnetic Measurements, Conference Digest 2002 Conference*, p. 110 – 111, 2002.
- [7] Martienssen W., Warlimont H.: *Springer handbook of condensed matter and materials data*, Tom 1, Springer 2005.
- [8] Scarioni L., Klonz, M., Janik D., Laiz, H., Kampik M.: High-frequency thin-film multijunction thermal converter on a quartz crystal chip, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions* Vol. 52, Issue 2, p. 345 - 349, April 2003.
- [9] Lipe T.E., Kinard J.R., Scarioni L.: Development of MJTCs on fused silica substrates at NIST, *Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2010 Conference*, p. 95 - 96, 2010.
- [10] Dintner H., Klonz M., Lerm A., Volklein F., Weimann T.: AC-DC-mV-transfer with highly sensitive thin-film multijunction thermal converters, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, Vol. 42, Issue 2, p. 612 - 614, April 1993.
- [11] Scarioni L., Klonz M., Kessler E.: Explanation for the AC–DC Voltage Transfer Differences in Thin-Film Multijunction Thermal Converters on Silicon Chips at High Frequencies, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, Vol. 56, Issue 2, p. 567 - 570, April 2007.
- [12] Scarioni L., Klonz M., Funck T., Judaschke R., Kessler, E.: Quartz Thin-Film Multijunction Thermal Converters With Built-In Tee Connector for 100 MHz, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, Vol. 56, Issue 2, p. 571 - 575, April 2007.
- [13] Scarioni L., Klonz M., Funck T., Kessler E.: New Generation of Crystal Quartz Thin-Film Multijunction Thermal Converters, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, Vol. 55, Issue 6, p. 2281 – 2285, December 2006.

otrzymano / received: 14.05.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2012

artykuł recenzowany / revised paper