

Marian KAMPIK

## TERMICZNE PRZETWORNIKI WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘĆ I PRĄDÓW - PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe konstrukcje termicznych przetworników wartości skutecznej, omówiono najważniejsze parametry tych przetworników oraz porównano ich właściwości.

## A COMPARISON OF THE PROPERTIES OF THERMAL RMS CONVERTERS

Summary. Basic constructions and main parameters of thermal true-RMS converters are presented in this paper.

## THERMOUMFORMER DER EFFEKTIVEN SPANNUNG UND STROMSTARKE - VERGLEICH DER EIGENSCHAFTEN

Zusammenfassung. In der Arbeit sind die Grundstrukturen und charakteristische Parameter von den Thermoumformern für Effektivwertmessung beschrieben und verglichen.

### 1. Wprowadzenie

Spośród różnych przyrządów, umożliwiających dokładny pomiar wartości skutecznej napięcia i prądu, największe znaczenie posiadają obecnie przyrządy, wykorzystujące przetworniki termiczne. Zasada działania tych przetworników wynika z definicji wartości skutecznej, która jest miarą energii elektrycznej przetwarzanej na energię cieplną w jednostce czasu w rezystorze o jednostkowej wartości. Przyrost temperatury tego rezystora (nazywanego dalej grzejnikiem) jest proporcjonalny do wydzielonej w nim energii cieplnej. Zatem w idealnym przetworniku termicznym przyrost temperatury grzejnika przy przepływie prądu stałego jest równy przyrostowi temperatury prądu zmiennego o wartości skutecznej równej wartości prądu stałego. Wynika stąd możliwość transferu miary prądu stałego lub napięcia

stałego. Wygodnie jest przetworzyć wielkość nieelektryczną, jaką jest przyrost temperatury, na odpowiadającą jej wielkość elektryczną (napięcie, rezystancję). Do tego celu najczęściej wykorzystuje się następujące zjawiska fizyczne:

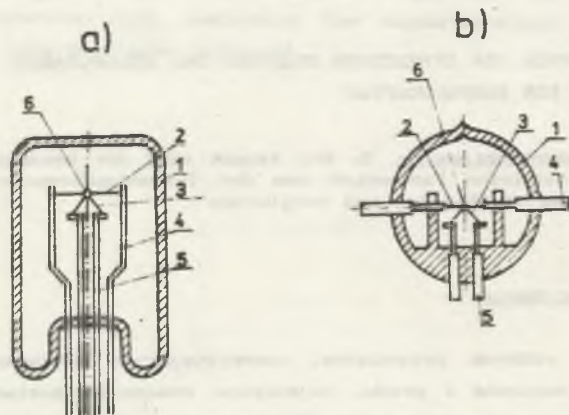
- zjawisko termoelektryczne,
- zmianę parametrów złącza n-p pod wpływem temperatury,
- zależność rezystancji półprzewodnika od temperatury.

Od sposobu przetwarzania temperatury grzejnika zależy dokładność przetwornika. W pracy niniejszej przedstawione zostaną, w celu porównania, właściwości przetworników wykorzystujących różne sposoby przetwarzania temperatury grzejnika.

## 2. Konstrukcje wybranych przetworników termicznych

### 2.1. Przetworniki termoelektryczne

W przetwornikach termoelektrycznych do przetworzenia temperatury grzejnika wykorzystuje się zjawisko termoelektryczne w termoparach. Najprostszą konstrukcją charakteryzuje się *przetwornik termoelektryczny jednozłączowy* (ang. *Single Junction Thermal Converter - SJTC*) (rys. 1).

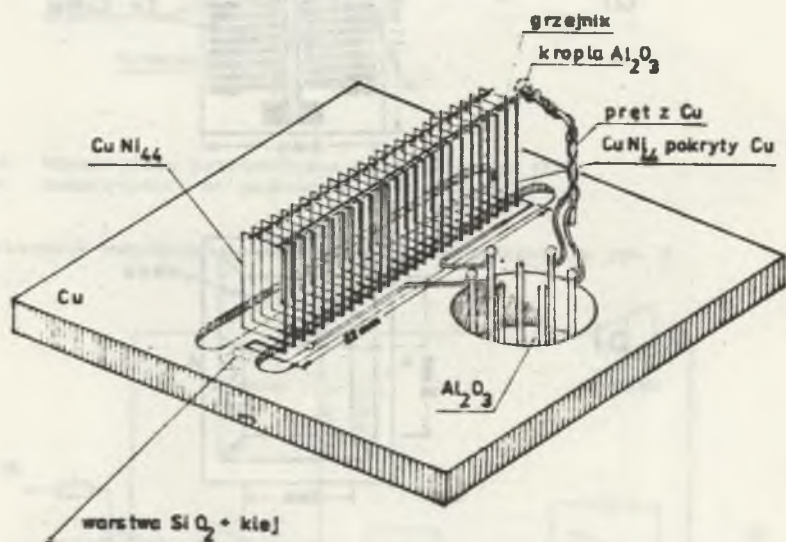


Rys.1. Konstrukcja termoelektrycznych przetworników jednozłączowych: a) w obudowie typu Standard Pattern, b) w obudowie typu UHF Standard [1]  
 Fig.1. Constructions of single junction thermal converters a) Standard Pattern type, b) UHF Standard Type [1]

Grzejnik (2) tego przetwornika wykonany jest z niemagnetycznego stopu o dużej rezystywności i małym współczynniku Thomsona i ma postać pręta o długości nie przekraczającej zazwyczaj kilku milimetrów i średnicy kilkunastu mikrometrów. Grzejnik podtrzymywany jest przez dwie podpory (4).

wykonane z niemagnetycznego stopu charakteryzującego się małym współczynnikiem Peltiera względem materiału, z którego wykonano grzejnik. Podpory te doprowadzają do grzejnika prąd elektryczny. W środkowym punkcie grzejnika przymocowana jest, za pośrednictwem kropki dielektryka (6), termopara (3). Termoparę podtrzymują dwie podpory (5), stanowiące jednocześnie jej doprowadzenia elektryczne. Całość umieszczona jest w szklanej obudowie (1), z której wypompowano powietrze.

Bardziej skomplikowaną konstrukcją charakteryzuje się przetwornik termoelektryczny wielozłączowy (ang. *MultiJunction Thermal Converter - MJTC*) (rys. 2).

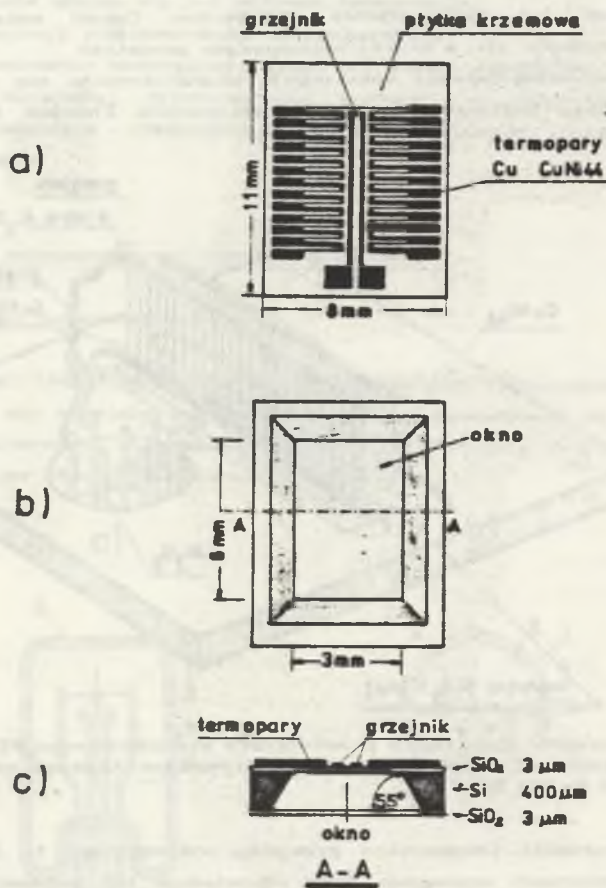


Rys.2. Szczegóły konstrukcji przetwornika wielozłączowego PTB [8]  
 Fig.2. Details of construction of multijunction thermal converter elaborated in PTB [8]

Do przetwarzania temperatury grzejnika wykorzystano tu kilkadziesiąt termopar połączonych szeregowo. Przy odpowiednim ich rozmieszczeniu oraz wykonaniu grzejnika w postaci bifilarnej możliwe jest prawie całkowite wyeliminowanie wpływu zjawisk termoelektrycznych w grzejniku [8]. Technologia wykonania takiego przetwornika jest bardzo skomplikowana.

Odmianą termoelektrycznych przetworników wielozłączowych są wielozłączowe przetworniki cienkowarstwowe nazywane też przetwornikami planarnymi (ang. *Thin Film MultiJunction Thermal Converter - TFMJTC*) [10]. Grzejnik i termopary tego przetwornika są wykonane metodą napylenia odpowiednich stopów na płytce krzemowej pokrytą cienką warstwą  $\text{SiO}_2$  (rys. 3). Płytkę krzemową jest następnie tak wytrawiana, aby grzejnik i gorące

spoiny termopar podtrzymywane były cienką warstwą  $\text{SiO}_2$  (rys. 3c). Przetwornik planarny posiada te same zalety co zwykły przetwornik wielozłączowy, a jednocześnie jest znacznie tanszy. Możliwa jest jego produkcja masowa.

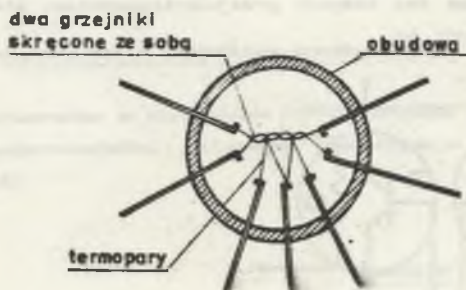


Rys.3. Przetwornik cienkowarstwowy PTB; a) widok z góry, b) widok od spodu, c) przekrój boczny [10]  
Fig.3 Thin film multijunction thermal converter elaborated in PTB; a) top view, b) bottom view, c) cross-section [10]

Próby zminimalizowania czasu pomiaru przetwornikami termoelektrycznymi doprowadziły do skonstruowania izotermicznych wielozłączowych przetworników termoelektrycznych nazywanych dalej przetwornikami izotermicznymi (ang. Isothermal Multi-Junction Thermal Converter - IMJTC) [7]. Przetwornik izotermiczny posiada dwa skrócone ze sobą grzejniki, które są od sie-



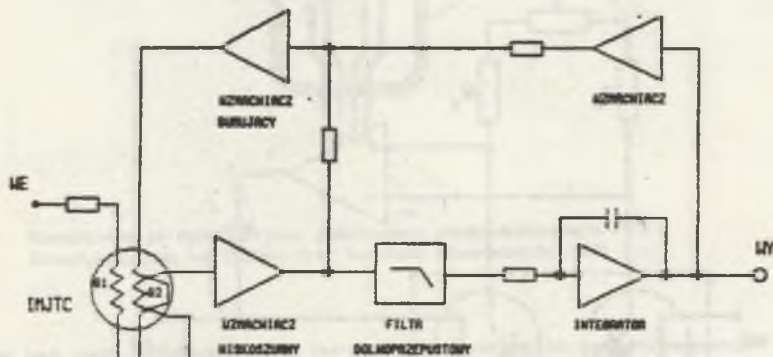
bie elektrycznie izolowane. Skrećenie zapewnia dobry kontakt cieplny dla obu grzejników. Detekcja temperatury grzejnika jest realizowana przez dwie termopary połączone szeregowo (rys. 4).



Rys.4. Konstrukcja przetwornika izotermicznego [7]

Fig.4. Construction of isothermal converter [7]

Przetwornik współpracuje z układem przedstawionym na rys. 5.



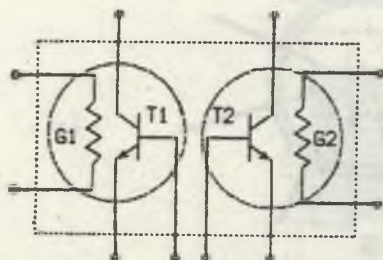
Rys.5. Układ współpracujący z przetwornikiem izotermicznym [7]

Fig.5. AC-DC converter with isothermal converter [7]

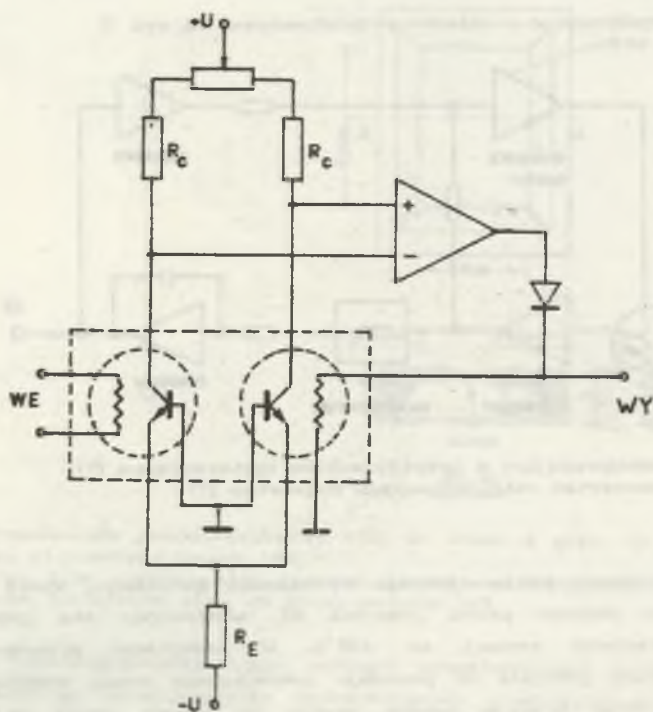
Układ ten zawiera pętle ujemnego sprzężenia zwrotnego, która wymusza przepływ prądu stałego przez grzejnik G2, utrzymując oba grzejniki w stałej temperaturze równej ok. 135°C. W rezultacie przepływ prądu wejściowego przez grzejnik G1 powoduje zmniejszenie prądu wymuszanego w grzejniku G2. Układ reaguje bardzo szybko na zmiany prądu wejściowego. Napięcie na wyjściu układu jest proporcjonalne do kwadratu wartości skutecznej prądu wejściowego przetwornika.

## 2.2. Przetworniki z czujnikiem tranzystorowym

W przetwornikach z czujnikiem tranzystorowym wykorzystuje się zjawisko zmiany napięcia baza-emiter tranzystora pod wpływem temperatury. W skład typowego przetwornika wchodzi dwa zespoły grzejnik-tranzystor, które są od siebie izolowane termicznie (rys. 6).



Rys.6. Przetwornik z czujnikiem tranzystorowym [3]  
Fig.6. Transistor thermal converter [3]

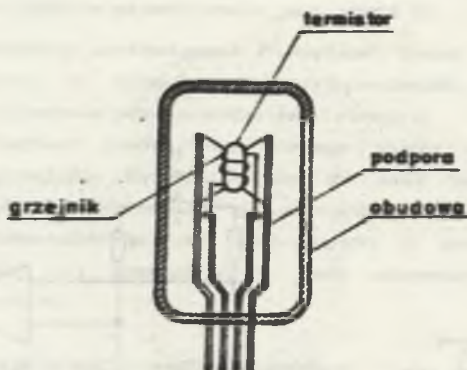


Rys.7. Układ współpracujący z przetwornikiem przedstawionym na rys. 6 [3]  
Fig.7. AC-DC converter with transistor thermal converter [3]

Przetwornik współpracuje z układem różnicowym przedstawionym na rys. 7. Napięcie wyjściowe układu jest funkcją kwadratu wartości skutecznej prądu wejściowego. Z uwagi na nieliniowość tej funkcji w celu zwiększenia dokładności pomiaru stosuje się cyfrowe techniki korekcyjne [3].

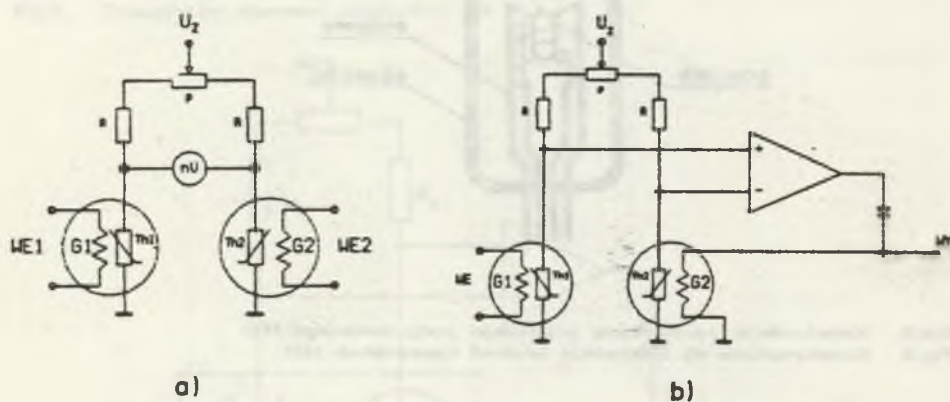
### 2.3. Przetworniki z czujnikiem termistorowym

W przetworniku z czujnikiem termistorowym grzejnik owinięty jest wokół kropki półprzewodnika, którego rezystancja zależy od temperatury (rys. 8) [12].



Rys.8. Konstrukcja termistora pośrednio podgrzewanego [12]  
Fig.8. Construction of indirectly heated thermistor [12]

Układ ten nosi również nazwę *termistora pośrednio podgrzewanego*. Zaletą przetwornika jest duża czułość, wadami: wrażliwość na zmianę temperatury otoczenia oraz starzenie. Zminimalizowanie wpływu temperatury otoczenia jest możliwe w układach, przedstawionych na rys. 9. Napięcie wyjściowe układu różnicowego (rys. 9b) jest proporcjonalne do kwadratu wartości skutecznej napięcia wejściowego.



Rys.9. Układy współpracujące z przetwornikami termistorowymi: a) mostkowy, b) różnicowy  
 Fig.9. AC-DC converters with indirectly heated thermistors: a) bridge type, b) differential type



### 3. Podstawowe parametry opisujące właściwości przetworników termicznych

Do podstawowych parametrów opisujących właściwości przetworników termicznych zaliczyć można:

1) *Błąd transferowy*  $\delta_c$  przetwornika definiowany następująco:

$$\delta_c = \frac{I_a - I_d}{I_d}, \quad (1)$$

gdzie:  $I_a$  - wartość skuteczna prądu grzejnika, dla której napięcie wyjściowe przetwornika jest równe  $E$ ;

$I_d$  - średnia arytmetyczna z wartości dwóch prądów stałych grzejnika, o przeciwnych biegunowościach, dla których napięcie wyjściowe przetwornika jest równe  $E$ .

Wartość błędu transferowego zależy od częstotliwości prądu grzejnika. Przyjmuje się, że przy częstotliwości ok. 1 kHz błąd transferowy zdeterminowany jest wyłącznie zjawiskami termoelektrycznymi zachodzącymi w grzejniku [8], dlatego  $\delta_c$  dla tej częstotliwości jest nazywany błędem termoelektrycznym.

2) *Błąd rewersji*  $p$  definiowany następująco:

$$p = \frac{I_d^+ + I_d^-}{I_d}, \quad (2)$$

gdzie:  $I_d^+$ ,  $I_d^-$  - wartości prądu stałego grzejnika, o przeciwnych biegunowościach, dla których na wyjściu przetwornika otrzymuje się tę samą wartość napięcia;

$$I_c = \frac{I_d^+ - I_d^-}{2} \quad (2a)$$

Błąd rewersji jest zdeterminowany przebiegiem zjawisk termoelektrycznych w grzejniku przetwornika. Jeśli zmiana polaryzacji prądu wejściowego powoduje zmianę napięcia wyjściowego przetwornika, to świadczy to o niezerowej wartości błędu rewersji. Należy podkreślić, iż brak błędu rewersji ( $p = 0$ ) nie oznacza, że przetwornik charakteryzuje się zerowym błędem termoelektrycznym.

3) Błąd kwadratowości  $\delta_k$  definiowany następująco:

$$\delta_k = \frac{n}{2} - 1, \quad (3)$$

gdzie:  $n$  - wykładnik funkcji przetwarzania przetwornika (czyli funkcji postaci  $E = kI^n$ ); dla przetwornika idealnego  $n = 2$ .

Wartość błędu kwadratowości zazwyczaj rośnie ze wzrostem wartości prądu płynącego przez grzejnik, co związane jest z nieliniową zależnością rezystancji grzejnika oraz przewodności cieplnej materiału grzejnika od temperatury.

4) Czas pojedynczego pomiaru  $t_1$  rozumiany jako czas wymagany dla zdeterminowania wartości skutecznej prądu. W przypadku przetworników jednozłączowego, wielozłączowego i planarnego  $t_1$  jest czasem zdeterminowania wartości skutecznej przy zastosowaniu metody niejednoczesnego porównania, przy założeniu że temperatura początkowa grzejnika była równa temperaturze otoczenia, czas pomiędzy podaniem na grzejnik  $I_d^+$ ,  $I_a$ ,  $I_d^-$  jest równy ok.  $10^{-4}$  s, i wartość napięcia na wyjściu przetwornika różni się od wartości ustalonej nie więcej niż 1 ppm.

5) Rezystancja wyjściowa  $r_o$  przetwornika w przypadku przetworników termoelektrycznych jest rezystancją termopary (lub termopar). Dla przetworników termistorowych podaje się zazwyczaj rezystancję czujnika termistorowego w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  lub  $25^\circ\text{C}$ . Wartość rezystancji wyjściowej powinna być jak najmniejsza ze względu na szumy termiczne.

6) Znamionowe napięcie wyjściowe  $E_o$  definiowane jest dla przetworników termoelektrycznych. Jest to wartość napięcia wyjściowego, która wystąpi podczas przepływu przez grzejnik prądu znamionowego. Wyższe znamionowe napięcie wyjściowe pozwala na zwiększenie rozdzielczości pomiaru oraz umożliwia zmniejszenie wpływu zakłóceń.

#### 4. Porównanie właściwości wybranych przetworników termicznych

W celu porównania w tabelicy 1 zestawiono przykładowe parametry przetworników termicznych. Parametry przetworników jednozłączowych (SJTC), wytwarzanych przez wielu producentów, są silnie zróżnicowane, dlatego w tabelicy 1 przedstawiono przeważnie ich wartości maksymalne. Użytkownicy zazwyczaj selekcionują egzemplarze o najlepszych właściwościach. Przetworniki wielozłączowe (MJTC) są wytwarzane w kilku ośrodkach, z reguły na zamówienie. W tabelicy 1 przedstawiono dane przetwornika opracowanego

w PTB [8], stosowanego jako element składowy etalonu napięcia przemiennego w większości krajów zrzeszonych w EWG. Przetwornik cienkowarstwowy (TFMJTC) opracowany został również w PTB [10]. Parametry przedstawione w tabelicy 1 dotyczą egzemplarza doświadczalnego. W celu oszacowania wartości błędu termoelektrycznego grzejnik tego przetwornika wykonano z chromoni-kieliny o stosunkowo dużym współczynniku Thomsons'a. Przetwornik izoter-miczny (MJTC) opisano w pracy [7]. Przetwornik ten zastosowano w kalibra-torze napięć przemiennych [6]. Układ z przetwornikiem tranzystorowym jest stosowany przez firmę Fluke. Dane dotyczące tego układu opracowano na podstawie pracy [2]. Parametry układu z przetwornikami termistorowymi (rys. 9a) są zawarte w pracy [12].

Tablica 1

Zestawienie parametrów przetworników termicznych

Typ przetw.	SJTC	MJTC	TFMJTC	Układ z IMJTC	Układ z cz. tranz.	Układ z cz. termis.
$\delta_c$ (1kHz) [ppm]	< 10	< 0,2	< 2 <sup>a)</sup>	< 10	> 20	$\geq 250$ <sup>b)</sup>
$\delta_c$ (1MHz) [ppm]	$\leq 5$	$\geq 10$	—	$\geq 10$	> 500	—
$P$ [ppm]	< 1000	< 10 <sup>c)</sup>	< 200 <sup>d)</sup>	< 10	> 4	< 200
$\delta_k$ [%]	< 0,3	< 0,002	< 0,001	< 2	> 0,4	—
$t_1$	~ 60 s	kilka minut	< 2 s	< 1 s	< 60 s	kilka minut
$r_o$ [Ω]	,15 - 2k	> 100	~ 5000	< 40	—	—
$E_o$ [mV]	< 20	< 500	< 500	< 50	—	—
Stosowane częst. czt. [MHz]	< 1000	< 1	< 1	< 100	< 10	< 1
Koszt produkcji	niski	wysoki	niski	średni	średni	niski
Zastosowanie	etalony op. prz. > 1 MHz, wzorce op. przem.	etalony napięcia przem. do 1 MHz	kalibratory, wzorce nap. przem.	kalibratory	kalibratory, multi-metry	obecnie rzadko stosowany

a) dla grzejnika wykonanego z NiCr (o dużym wsp. Thomsons'a);

b) dla dwóch przetworników w układzie mostkowym [12];

c) dla przetwornika NPL 14 [4];

d) dla przetwornika opracowanego w Delft (Holandia) [5];

## Podsumowanie

Z danych przedstawionych w tabelicy 1 wynika, że przetworniki termoelektryczne należą do najdokładniejszych przetworników wartości skutecznej. W pasmie częstotliwości do ok. 1 MHz najwyższą dokładnością charakteryzują się przetworniki wielozłączowe. Niekorzystną właściwość, jaką jest stosunkowo duża wartość ich rezystancji wyjściowej, jest kompensowana większą wartością napięcia wyjściowego. Jednak czas pojedynczego pomiaru tym przetwornikiem jest długi. Stwarza to konieczność stosowania technik minimalizujących dryfty [11]. Przetworniki te są drogie, nie nadające się do produkcji masowej.

Przetworniki jednozłączowe charakteryzują się większymi błędami termoelektrycznymi, ale ich błąd transferowy przy wyższych częstotliwościach jest relatywnie niski. Umożliwia to realizację etalonów wartości skutecznej dla częstotliwości powyżej 1 MHz. Przetworniki te charakteryzują się mniejszą wartością napięcia wyjściowego, ale jednocześnie ich rezystancja wyjściowa jest znacznie mniejsza. Czas pojedynczego pomiaru jest również krótszy. Radykalne skrócenie czasu pomiaru jest możliwe po zastosowaniu przetworników izotermicznych. Niestety, okupione jest to zmniejszeniem dokładności [6].

Bydące obecnie obiektami zainteresowania przetworniki cienkowarstwowe łączą zalety przetworników wielozłączowych (małe błędy termoelektryczne) oraz izotermicznych (krótki czas pomiaru). Bardzo ważną zaletą tego przetwornika jest jego relatywnie niski koszt. Stwarza to możliwość produkcji masowej.

Układy z przetwornikami tranzystorowymi są obecnie szeroko stosowane w kalibratorach i multimetrach. Nie zapewniają tak dużej dokładności, jak przetworniki termoelektryczne jedno- i wielozłączowe, ale czas pomiaru jest stosunkowo krótki. Układy z przetwornikami termistorowymi są najmniej dokładne, a jednocześnie czas pomiaru wartości skutecznej jest długi. Dlatego układy te są obecnie bardzo rzadko stosowane.

## LITERATURA

- [1] Barański A.: Termoelementy w miernictwie elektrycznym - potrzeba normalizacji. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 1-2, 1986.
- [2] Fluke 792A AC/DC Transfer Standard Instruction Manual.
- [3] Goyal R., Brodie B.: Recent Advances in Precision AC Measurements IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-33, nr 3, September 1984.



- [4] Hermach F., Williams E.: Thermal Converters for Audio-Frequency Voltage Measurements of High Accuracy. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-15, nr 4, December 1966.
- [5] Herwaarden A., Hochstenbach H., Harmans K.: Integrated True RMS Converter. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-35, nr 2, June 1986.
- [6] Katzmann F.: A New AC Voltage Standard. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 38, nr 1, February 1989.
- [7] Katzmann F.: A New Isothermal Multijunction Differential Thermal Element Provides Fast Settling AC to DC Converter. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 38, nr 2, April 1989.
- [8] Klonz M.: AC-DC Transfer Difference of the PTB Multijunction Thermal Converter in the Frequency Range from 10 Hz to 100 kHz. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-36, nr 2, June 1986.
- [9] Klonz M.: AC-DC Voltage Transfer Difference of the PTB-Multijunction Thermal Converter at 1 MHz. Mat. CPEM'90 Digest, Ottawa, June 1990.
- [10] Klonz M., Weimann T.: Accurate Thin Film Multijunction Thermal Converter on a Silicon Chip. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 38, nr 2, April 1989.
- [11] Knight R., Legg D., Martin P.: Digital 'bridge' for comparison of AC-DC transfer instruments. IEE Proceedings-A, vol. 138, nr 3, May 1991.
- [12] Widdis F.: The indirectly heated thermistor as a precise A.C.-D.C. transfer device. Proc. Inst. Elec. Eng., vol. 103, part B, nr 12, November 1956.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Danuta Turzeniecka

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 grudnia 1991 r.

## A COMPARISON OF THE PROPERTIES OF THERMAL RMS CONVERTERS

### Abstract

Basic constructions of thermal true-RMS converters are presented (fig.1-9), and the most important parameters are defined (Eq. 1-3). A comparison of devices having different thermal detectors shows that (Tab.1):

- Multijunction Thermal Converters ( MJTC ) are the most precise AC-DC transfer devices in 40 Hz - 1 MHz range;
- Single Junction Thermal Converters ( SJTC ) are the best transfer devices in 1 MHz - 1 GHz range;
- Thin-Film Multijunction Thermal Converters are a good compromise between precise but sluggish MJTCs, and fast but less accurate Isothermal MJTCs or similar devices using transistors to detect the temperature of heaters.