

Marian KAMPIK

## NAPIĘCIOWY TRANSFER AC-DC

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wybrane właściwości elementów napięciowego transferu AC-DC budowanego w Instytucie Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechniki Śląskiej. Zbadano wpływ właściwości zastosowanego termicznego przetwornika wartości skutecznej, woltomierza realizującego pomiar napięcia wyjściowego przetwornika, przełącznika transferowego oraz użytych kalibratorów na przebieg transferu. Przeanalizowano wpływ czasu martwego przełącznika na czas ustalania się temperatury grzejnika przetwornika. Podano również zastosowanie transferu oraz jego inherentną stabilność.

## VOLTAGE AC-DC TRANSFER

**Summary.** In this paper the properties of components of the voltage ac-dc transfer built in the Institute of Metrology and Electrotechnical Control at the Silesian Technical University in Gliwice are presented. The effect of the thermal RMS converter, voltmeter used to measure the output voltage of the converter, transfer switch and used calibrators on the transfer process is investigated. The effect of the dead time of the transfer switch on the settling time of the heater temperature is analysed. The application of the transfer and its inherent stability is also given.

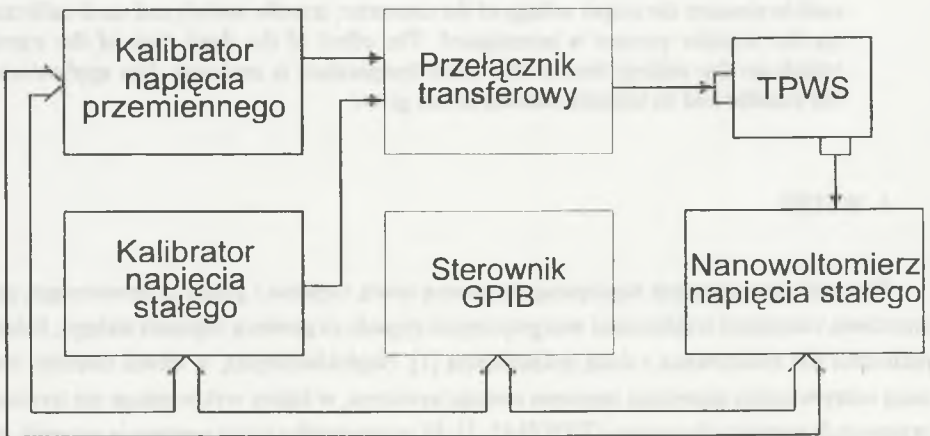
### 1. WSTĘP

Wartość skuteczna jest najczęściej stosowaną miarą napięcia i prądu przemiennego, gdyż umożliwia określenie właściwości energetycznych sygnału za pomocą napięcia stałego, którego jednostka jest realizowana z dużą dokładnością [1]. Najdokładniejszą, w chwili obecnej, realizację miary wartości skutecznej zapewnia metoda termiczna, w której wykorzystuje się termiczny przetwornik wartości skutecznej (TPWS) [2, 3]. W przetworniku takim występuje grzejnik oraz sprzężony z nim termicznie czujnik termometryczny w postaci złącza termoelektrycznego lub wielu złącz połączonych szeregowo. Etalonowe TPWS są wzorcami liczalnymi [4, 5]. Właściwości metrologiczne pozostałych przetworników wyznacza się przez porównanie

z etalonowymi TPWS. W praktyce wzorcowa realizacja miary wartości skutecznej napięcia przemiennego polega na wytworzeniu prawie sinusoidalnego napięcia za pomocą kalibratora napięcia przemiennego. Wartość skuteczną tego napięcia określa się przy wykorzystaniu TPWS metodą podstawienia napięcia stałego wytworzonego za pomocą kalibratora napięcia stałego. Procedura ta nazywana jest transferem AC-DC. Proces wzorcowania TPWS jest niekiedy również nazywany transferem AC-DC. Wzorcowa procedura transferu AC-DC stawia dość duże wymagania operatorowi oraz jest bardzo czasochłonna. Z tego powodu dąży się do jej zautomatyzowania [6]. Koszt poszczególnych elementów transferu jest duży. W skład typowego transferu wchodzi kalibratory napięcia przemiennego i stałego, odpowiednia liczba TPWS, nanowoltomierze napięcia stałego, przełącznik transferowy oraz oprogramowany sterownik. Osiągnięcie dużej dokładności transferu wymaga zbadania właściwości jego poszczególnych elementów składowych. W pracy przedstawiono wyniki badań elementów transferu AC-DC budowanego w Instytucie Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechniki Śląskiej.

## 2. ELEMENTY SKŁADOWE TRANSFERU

W skład zbudowanego transferu wchodzi termiczny przetwornik wartości skutecznej umieszczony w odpowiedniej obudowie, multimetr Datron 1271, realizujący pomiar napięcia wyjściowego TPWS, kalibrator napięcia przemiennego Fluke 5200A, kalibrator napięcia stałego Meratronik Z183, ręczny przełącznik transferowy oraz komputer klasy IBM PC wyposażony w kartę GPIB. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 1.

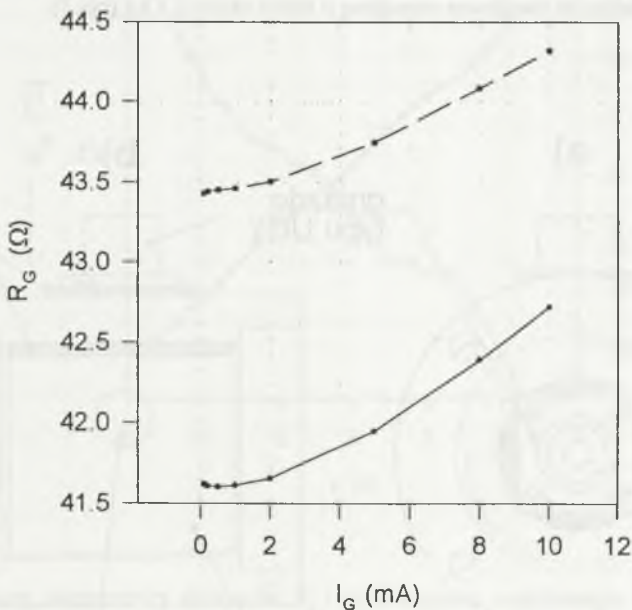


Rys. 1. Ogólny schemat stanowiska do napięciowego transferu AC-DC  
 Fig. 1. The general diagram of the system for the voltage ac-dc transfer

### 3. WYNIKI BADAŃ TERMICZNEGO PRZETWORNIKA WARTOŚCI SKUTECZNEJ, ZASTOSOWANEGO W TRANSFERZE

W transferze zastosowano jednozłączowy termiczny przetwornik wartości skutecznej firmy Best Technology w obudowie typu Standard o następujących parametrach:

- nominalny prąd grzejnika  $I_N = 10 \text{ mA}$ ,
- nominalne napięcie wyjściowe  $E_N = 10 \dots 13 \text{ mV}$ ,
- rezystancja grzejnika  $R_G = 50 \Omega$ ,
- rezystancja termoelementu  $R_o = 8 \Omega$ .



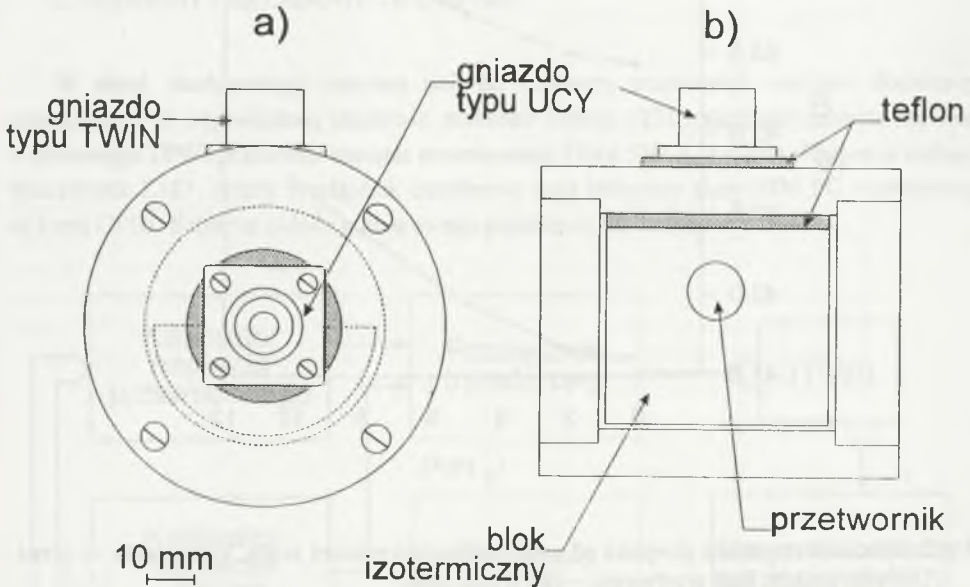
Rys.2. Zależność rezystancji grzejnika od przepływającego prądu. Linia ciągła — przed wystarzeniem, linia przerywana — po wystarzeniu

Fig.2. The heater resistance vs. heater current. Solid line — before ageing, dashed line — after ageing

Pomiar rezystancji  $R_G$  grzejnika metodą techniczną przy prądzie stałym wykazał jej zależność od kwadratu prądu pomiarowego. Zjawisko to powoduje zwiększenie różnicy transferowej przetwornika dla napięć o małych częstotliwościach (10 Hz...500 Hz) [5] oraz zwiększenie

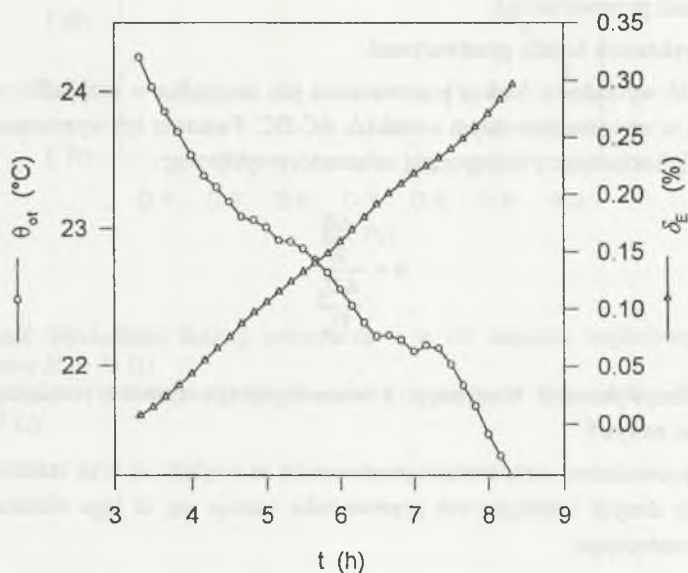
temperaturowego współczynnika napięcia wyjściowego [6]. W celu zmniejszenia temperaturowego współczynnika rezystancji grzejnik wystarżono przez kilkadziesiąt godzin przepuszczając przez niego prąd nominalny. Po wystarżeniu rezystancja grzejnika wzrosła o kilka procent, natomiast jej zależność od prądu grzejnika zmniejszyła się o około 30%. Na rys.2 przedstawiono zależność rezystancji grzejnika od prądu przed i po wystarżeniu. Wpływ zależności rezystancji grzejnika od prądu na różnicę transferową przetwornika w zakresie małych częstotliwości jest zminimalizowany przez włączenie w obwód grzejnika rezystora zakresowego [5]

Termiczna stała czasowa [6] przetwornika jest równa około 0,4 s. Doświadczalnie stwierdzono, iż przy przepływie przez grzejnik prądu znamionowego temperaturowy współczynnik napięcia wyjściowego przetwornika jest równy - 0,13%/K. Główną przyczyną tego zjawiska jest zależność ilości energii wypromieniowanej z grzejnika od temperatury obudowy [6]. W celu zminimalizowania wpływu szybkich zmian temperatury otoczenia na napięcie wyjściowe przetwornik umieszczono w obudowie mosiężnej o masie około 2,5 kg (rys.3).



Rys.3. Szkic obudowy przetwornika: a) widok od strony gniazda wejściowego, b) widok z góry  
Fig.3. The sketch of the converter housing: a) view from the input connector side, b) top view

Przetwornik termiczny został zamocowany w mosiężnym bloku izotermicznym, odizolowanym cieplnie od obudowy za pomocą warstwy teflonu. Gniazdo wejściowe, typu UCY, zostało odizolowane od obudowy za pomocą podkładki teflonowej. Gniazdo to, w razie potrzeby, może być zastąpione gniazdem typu N, które jest coraz powszechniej stosowane we wzorcowych TPWS. Zastosowanie gniazda wyjściowego typu Twin umożliwia zminimalizowanie wpływu sił termoelektrycznych. Obudowa jest uniwersalna. Można umieścić w niej przetworniki jednozłączowe różnych typów, w tym również wzorcowy przetwornik jednozłączowy firmy Best Technology, którego zakup planuje się w przyszłości. Efekt minimalizacji zmian temperatury otoczenia przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zmiany temperatury otoczenia  $\theta_{ot}$  i dryft napięcia wyjściowego  $\delta_E$  przetwornika bez rezystora zakresowego ( $U_G = 0,4$  V)

Fig. 4. Ambient temperature changes  $\theta_{ot}$  and output voltage drift  $\delta_E$  of the converter without the range resistor ( $U_G = 0,4$  V)

Różnica rewersyjna przetwornika, zdefiniowana następująco:

$$\delta_r = \frac{U_{DC+} - U_{DC-}}{U_{DC+}} \Big|_{E_{DC+} = E_{DC-}} \quad (1)$$

gdzie  $E_{DC}$  i  $E_{DC}$  są napięciami wyjściowymi przetwornika odpowiadającymi napięciom grzejnika równym odpowiednio  $U_G = U_{DC}$  i  $U_G = U_{DC}$ . została zmierzona za pomocą kalibratora napięcia stałego Meratronik Z183. Dla  $U_G = 0,4$  V otrzymano  $\delta_r \approx 1,0 \cdot 10^{-4}$ . Różnica rewersyjna wielozłączowych, etalonowych TPWS jest o rząd mniejsza.

Funkcja przetwarzania TPWS, czyli zależność stałego napięcia wyjściowego  $E$  od napięcia  $U_G$  podanego na grzejnik ma następującą postać:

$$E = kU_G^n, \quad (2)$$

gdzie:  $k$  — stała przetwarzania,

$n$  — wykładnik funkcji przetwarzania.

Znajomość wykładnika funkcji przetwarzania jest niezbędna w przypadku wykorzystania przetwornika w zautomatyzowanym transferze AC-DC. Parametr ten wyznaczono dla małych przyrostów  $U_G$  korzystając z następującej zależności przybliżonej:

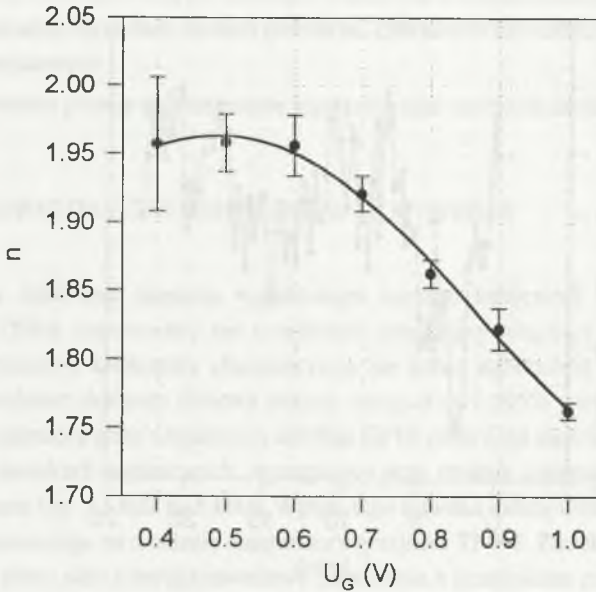
$$n = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta U_G}{U_G}}. \quad (3)$$

Pomiar ten wykonano korzystając z automatycznego systemu pomiarowego. Wyniki przedstawiono na rys.5.

Nie przeprowadzono wzorcowania przetwornika ze względu na brak etalonowego TPWS. Na podstawie danych katalogowych przetwornika szacuje się, iż jego różnica transferowa, definiowana następująco

$$\delta_t = \frac{U_{AC} - U_{DC}}{U_{DC}} \Big|_{E_{AC} = E_{DC}}, \quad (4)$$

gdzie  $E_{AC}$  i  $E_{DC}$  są napięciami wyjściowymi odpowiadającymi napięciom grzejnika  $U_G$  równym odpowiednio  $U_{AC}$  i  $U_{DC}$  jest mniejsza od  $1 \cdot 10^{-4}$  dla częstotliwości napięcia na grzejniku równej 1 kHz. Planuje się przeprowadzenie wzorcowania przetwornika w laboratorium Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

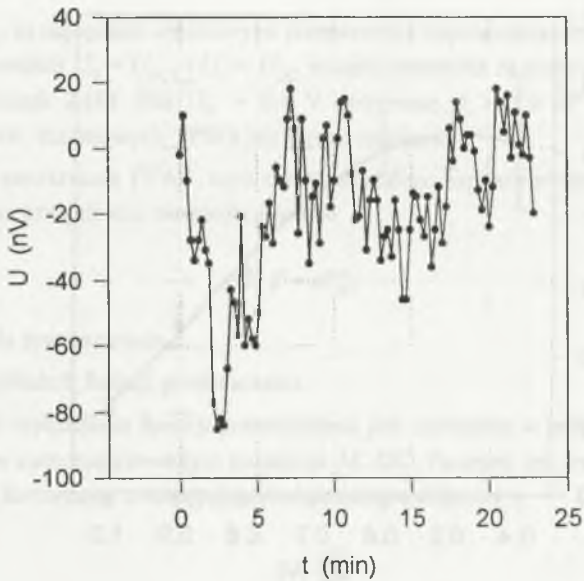


Rys.5. Zależność wykładnika funkcji przetwarzania  $n$  od napięcia wejściowego (rezystor zakresowy  $R_z = 75 \Omega$ )

Fig.5. The exponent  $n$  of the transfer function of the converter vs. input voltage (range resistor  $R_z = 75 \Omega$ )

#### 4. WOLTOMIERZ DO POMIARU NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO TPWS

Pomiar napięcia wyjściowego przetwornika realizowany jest za pomocą multimetru Datron 1271. Przyrząd ten umożliwia pomiar napięcia stałego z rozdzielczością 1 nV. Tak dużą rozdzielczość osiągnięto przez zastosowanie metody uśrednienia wielu pomiarów, a więc inaczej niż w przypadku nanowoltomierzy, w których dużą rozdzielczość osiąga się poprzez wzmacnianie sygnału za pomocą wzmacniaczy o bardzo małym dryfcie temperaturowym i małych szumach [8]. Z tego powodu szумы woltomierza multimetru Datron są większe niż szумы współczesnego nanowoltomierza (rys.6).



Rys. 6. Szumy woltmierz multimetru Datron 1271. Pomiar wykonano przy zwartych zaciskach wejściowych na zakresie 100 mV przy rozdzielczości 8 cyfr

Fig. 6. The noise of the voltmeter of the Datron 1271 multimeter. The measurement was taken with shorted input terminals on 100 mV range and resolution 8 digits.

Szumy te zwiększają niepewność pomiaru stałego napięcia wyjściowego TPWS i zgodnie z zależnością (3) wpływają na niepewność pomiaru napięcia podanego na grzejnik. Maksymalny błąd pomiaru wartości skutecznej metodą podstawienia napięcia stałego, wywołany szumami woltmierz, jest równy

$$\delta_{sz} = \frac{E_{sz,max}}{nE}, \quad (5)$$

gdzie:  $E_{sz,max}$  — wartość międzyszczytowa napięcia szumów woltmierz,

$n$  — wykładnik funkcji przetwarzania TPWS,

$E$  — napięcie wyjściowe TPWS.

W danym przypadku składowa niepewności realizacji wartości skutecznej napięcia przemiennego związana z szumami woltmierz jest mniejsza od około  $6 \cdot 10^{-6}$ .

Wpływ dryftu zera woltmierz można zminimalizować poprzez zastosowanie odpowiedniej sekwencji podstawienia napięcia grzejnika [7]. Doświadczalnie stwierdzono wpływ sił termo-



elektrycznych, które powstają na zaciskach wejściowych multimetru pod wpływem niewielkiej różnicy temperatury wywołanej ruchem powietrza. Zjawisko to zminimalizowano przez osłonięcie zacisków wejściowych.

W przyszłości planuje się zastąpienie tego przyrządu nanowoltomierzem napięcia stałego.

## 5. KALIBRATORY ZASTOSOWANE W TRANSFERZE

W torze stabilizacji napięcia wyjściowego użytego kalibratora napięcia przemiennego typu Fluke 5200A zastosowany jest prostownik operacyjny reagujący na wartość szczytową. Napięcie wyjściowe kalibratora charakteryzuje się dobrą stabilnością wartości napięcia wyjściowego (producent deklaruje dobowe zmiany mniejsze od 0,005% wartości nastawionej). Przy sterowaniu kalibratora przez wbudowany interfejs GPIB obserwuje się trwający około 0,2 s zanik napięcia na zaciskach wyjściowych, występujący przy zmianie zakresu częstotliwości generowanego napięcia (np. z 1 kHz na 5 kHz). Wpływ tego zjawiska należy uwzględnić przy określaniu czasu przeznaczanego na ustalenie temperatury grzejnika TPWS. Zaciski wyjściowe kalibratora umożliwiają dwu- albo czteroprzewodowe połączenie z grzejnikiem przetwornika. Przy połączeniu czteroprzewodowym, odłączenie zacisków SENSE może być przyczyną uszkodzenia grzejnika TPWS, gdyż na zaciskach wyjściowych występuje napięcie większe o około 2 V od wartości nastawionej. Ponadto odłączenie zacisków SENSE podczas komutacji wydłuża czas ustalania się napięcia wyjściowego. Stabilność długoterminowa oraz dokładność kalibratora będą przedmiotem dalszych badań.

Zastosowany kalibrator napięcia stałego typu Meratronik Z183 jest kalibratorem starszej generacji. W celu zmiany biegunowości napięcia stałego podawanego na grzejnik TPWS wymagane jest zastosowanie zewnętrznego przełącznika, umożliwiającego przełączanie przewodu uziemiającego. Deklarowana przez producenta dokładność jest równa 0,04%. Zaciski wyjściowe kalibratora umożliwiają dwu- albo czteroprzewodowe połączenie z grzejnikiem przetwornika. Przy połączeniu czteroprzewodowym, odłączenie zacisków SENSE może być przyczyną uszkodzenia grzejnika TPWS, gdyż na zaciskach wyjściowych występuje napięcie równe w przybliżeniu 120% nastawionego zakresu. Wbudowany interfejs IEC-625 umożliwia zastosowanie kalibratora w automatycznym systemie pomiarowym.

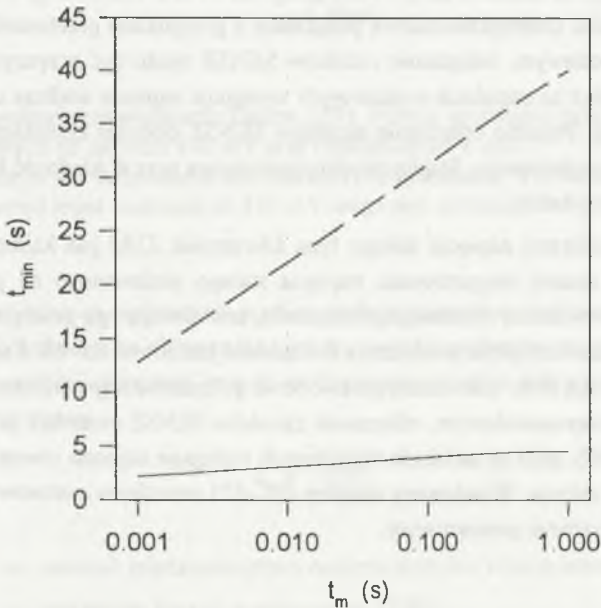
## 6. PRZEŁĄCZNIK TRANSFEROWY

Komutacja napięć podawanych na grzejnik przetwornika realizowana jest za pomocą ręcznego obrotowego przełącznika. Umożliwia on realizację połączenia dwu- oraz czteroprzewodowego pomiędzy zaciskami kalibratorów oraz grzejnikiem przetwornika. Trzy pozycje rotora

umożliwiają podanie na grzejnik przetwornika napięcia stałego (DC+), napięcia przemiennego (AC), oraz napięcia stałego o odwróconej biegunowości (DC-). Rezystancja pojedynczego styku przełącznika jest mniejsza od 20 mΩ, a siła termoelektryczna zmierzona na zaciskach natychmiast po odłączeniu napięcia nie przekracza 0,1 μV. Czas martwy przełącznika  $t_m$  (czyli czas zaniku napięcia na zaciskach wyjściowych przełącznika podczas przełączania) zależy od umiejętności operatora. Przeciętnie  $t_m < 50$  ms. Zjawisko to jest przyczyną chwilowego obniżenia temperatury grzejnika. Pomiar napięcia wyjściowego TPWS powinien być przeprowadzony po ponownym ustaleniu się temperatury grzejnika. Teoretycznie czas ten dąży do nieskończoności. W praktyce pomiaru napięcia wyjściowego TPWS dokonuje się po czasie  $t_{min}$  od ostatniej komutacji. Dla przyjętej, względnej różnicy  $\delta$  pomiędzy aktualną i ustaloną wartością napięcia wyjściowego czas ten oblicza się z zależności

$$t_{min} = \tau \ln \frac{1 - e^{-\frac{t_m}{\tau}}}{\delta}, \quad (6)$$

gdzie  $\tau$  — termiczna stała czasowa przetwornika.



Rys. 7. Zależność czasu  $t_{min}$  ustalenia się temperatury grzejnika od czasu martwego  $t_m$  przełącznika transferowego. Linia ciągła — dla przetwornika o termicznej stałej czasowej równej 0,4 s, linia przerywana — dla przetwornika o termicznej stałej czasowej równej 4 s

Fig. 7. Relation between the settling time  $t_{min}$  of the heater temperature and the dead time  $t_m$  of the transfer switch. Solid line — values for a thermal converter with time constant equals 0.4 s, dashed line — values for a thermal converter with time constant equals 4 s

Na rysunku 7 przedstawiono zależność  $t_{min}$  od czasu martwego dla przetworników o dwóch różnych, termicznych stałych czasowych. Dla obliczeń przyjęto  $\delta = 1 \cdot 10^{-6}$ .

Przy założeniu, że proces nagrzewania grzejnika charakteryzuje się inercją pierwszego rzędu, czas  $t_{ust}$  wymagany na ustalenie się temperatury po podaniu napięcia na zimny grzejnik obliczyć można z zależności

$$t_{ust} = \tau \ln \frac{1}{\delta}, \quad (7)$$

Dla  $\tau = 0,4$  s oraz  $\delta = 1 \cdot 10^{-6}$  otrzymuje się  $t_{ust} \approx 6$  s. W praktyce, w celu wyeliminowania wpływu powolnego procesu nagrzewania się mosiężnej obudowy przetwornika, pierwsze podstawienie AC-DC jest dokonywane po upływie kilkunastu minut od podania napięcia na zimny grzejnik. Po tym czasie dryft napięcia wyjściowego jest w przybliżeniu liniowy i jego wpływ może być zminimalizowany za pomocą odpowiedniej sekwencji podstawienia AC-DC [6, 7]. Wpływ nagrzewania obudowy jest mniejszy dla przetworników o małym temperaturowym współczynniku napięcia wyjściowego.

## 7. STEROWNIK SYSTEMU

Automatyczny system pomiarowy do transferu AC-DC nie stawia dużych wymagań co do szybkości transmisji danych po magistrali sterującej. Jako sterownik wystarcza komputer klasy IBM PC wyposażony w kartę interfejsu GPIB. Oprogramowanie systemu zrealizowano przy wykorzystaniu uniwersalnego, rezydentnego interpretera. Ułatwia to przenoszenie oprogramowania na komputery klasy HP 9000, często stosowane w państwowych laboratoriach transferów AC-DC.

## 8. ZASTOSOWANIE TRANSFERU I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Zbudowany transfer AC-DC umożliwia między innymi wzorcowanie kalibratorów napięcia przemiennego, używanych do wzorcowania woltomierzy napięcia przemiennego. Stanowisko umożliwia realizację pełnego napięciowego transferu AC-DC oraz AC-AC w zakresie częstotliwości wytwarzanych przez zastosowany kalibrator napięcia przemiennego (od 10 Hz do 1 MHz). W tym samym paśmie częstotliwości stanowisko umożliwia automatyczny pomiar błędu częstotliwościowego kalibratora napięcia przemiennego metodą niepełnego transferu AC-AC [9]. Inherentna stabilność systemu pomiarowego jest mniejsza od  $1 \cdot 10^{-6}$ . Opracowane programy komputerowe pozwalają na automatyczny pomiar istotnych parametrów metrologicznych termicznych przetworników wartości skutecznej oraz na badanie wpływu zmian temperatury otoczenia na proces transferu.

Stanowisko jest systematycznie rozbudowywane. Między innymi trwają prace nad skonstruowaniem przełącznika transferowego sterowanego za pomocą szyny GPIB. W przyszłości planuje się taką rozbudowę stanowiska, aby możliwe było komparowanie wzorcowych TPWS.

## LITERATURA

1. Pöpel R.: The Josephson effect and voltage standards. *Metrologia*, vol. 29, 1992.
2. Inglis B.: Standards for AC-DC transfer. *Metrologia*, vol. 29, 1992.
3. Kampik M., Miłek M.: Przetworniki termiczne w pomiarach wartości skutecznej prądu. *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, monografia 7, Warszawa 1992.
4. 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, No.2, 1987.
5. Klonz M.: Entwicklung von Vielfachthermokonvertern zur genauen Rückführung von Wechselgrößen auf äquivalente Gleichgrößen. *PTB-Bericht*, Braunschweig 1987.
6. Kampik M.: Termiczny przetwornik wartości skutecznej z piezorezonansowym czujnikiem termometrycznym przeznaczony do wzorcowego transferu AC-DC. *Rozprawa doktorska*. Gliwice 1996.
7. Kampik M., Skubis T.: Stanowisko do badań termicznego przetwornika wartości skutecznej o wyjściu częstotliwościowym. *Mat. XVII MKM*, Zielona Góra 1995.
8. Keithley 181 Nanovoltmeter Manual. Keithley Instruments.
9. Kampik M.: Stanowisko do wzorcowania kalibratora napięcia przemiennego. *Mat. XXIX MKM*, Lublin - Nałęczów 1997.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Michał Szyper

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 maja 1997

## Abstract

In the paper a system for voltage ac-dc transfer standard is described. The basic parameters of the single junction thermal converter (SJTC) used in the transfer are given: heater resistance and its ageing, temperature coefficient of the output voltage (-0,13%), thermal time constant (0,4 s), dc reversal difference ( $1 \cdot 10^{-4}$ ) and exponent of the transfer function of the converter. The value of the last parameter shows a great dependence on the heater voltage (Fig.5). The SJTC is placed in a heavy brass enclosure to increase the thermal lagging. A Datron 1271 multimeter is used to measure the very small dc output voltage of the SJTC. The effect of the input noise of the

multimeter on the uncertainty of the transfer is estimated (Eq.5). The properties of voltage calibrators used in the system are presented as well. The effect of the dead time of the transfer switch and the thermal time constant of the converter is theoretically analysed. Equations (6) and (7) estimate the time needed to settle the output voltage. At present the system can be used for calibration of ac voltage calibrators in the frequency range from 10 Hz to 1 MHz. Its inherent stability is better than  $1 \cdot 10^{-6}$ . Computer programs specially developed for the system allow determination of basic parameters of the thermal RMS converters in automatic or semiautomatic manner.