

PAWEŁ STUDZIŃSKI

WARSZAWA

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT ELEKTRONIKI

## Dokładność pomiaru temperatury za pomocą multimetru cyfrowego<sup>1</sup>.

### Streszczenie

*W referacie przedstawiono multimetr cyfrowy do pomiaru wielkości elektrycznych i nieelektrycznych takich jak temperatura, ciśnienie i wilgotność. Opisano strukturę układu do pomiaru temperatury. Wyznaczono i przeanalizowano błąd pomiaru temperatury.*

### Abstract

*The new universal multimeter for measurement of electrical and nonelectrical quantities such temperature, pressure and humidity is presented in the paper. The structure of temperature measurement circuit of that instrument is given. Errors of temperature measurements are discussed.*

### 1. WPROWADZENIE

Współczesne multimetry cyfrowe średniej klasy charakteryzują się dobrymi parametrami metrologicznymi, które umożliwiają, przy współpracy z zewnętrznymi czujnikami pomiarowymi, wykorzystanie tych przyrządów także do pomiarów wielkości nieelektrycznych. Przykładem takiego przyrządu jest multimetr cyfrowy typu DM22, który został opracowany w Przemysłowym Instytucie Elektroniki [3,6,7]. Przyrząd ten oprócz pomiaru wielkości elektrycznych umożliwia także pomiary temperatury, ciśnienia i wilgotności. Na szczególną uwagę zasługują możliwości multimetru w zakresie pomiarów temperatur. Pomiary temperatury mogą być wykonywane z rozdzielczością 0,01°C przy wykorzystaniu ośmiu typów termopar lub dwóch typów termorezystorów.

Artykuł dotyczy dokładnych pomiarów temperatury, które mogą być wykonywane przez multimetr cyfrowy współpracujący z odpowiednim czujnikiem termoparowym. W rozważaniach przyjęto, że czujnik do pomiaru temperatury jest opisany za pomocą charakterystyki zgodnej z normą i że nie wnosi on błędów pomiaru temperatury. W pierwszej części artykułu przedstawiono podstawowe własności czujników termoparowych oraz opisano strukturę toru do pomiaru temperatury. W części drugiej przeanalizowano tę strukturę i wyznaczono jej model matematyczny. W części końcowej wyznaczono zależność opisującą błędy pomiaru temperatury, a następnie dokonano oceny wpływu poszczególnych czynników na dokładność pomiaru.

### 2. STRUKTURA TORU DO POMIARÓW TEMPERATURY

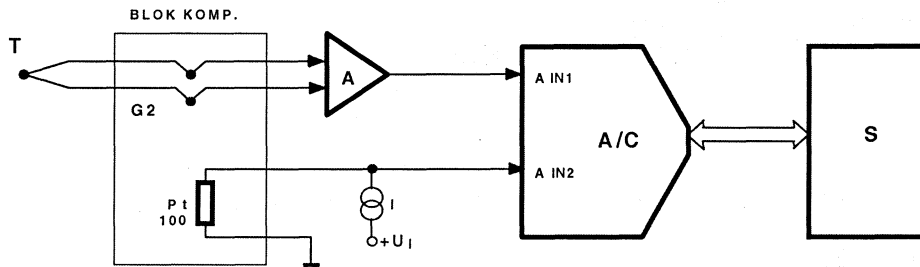
Multimetr cyfrowy typu DM22 umożliwia pomiary temperatury za pomocą czujników rezystancyjnych lub termoparowych. Pomiar temperatury przy wykorzystaniu termorezystorów sprowadza się do określenia wartości rezystancji czujnika, a następnie do wyznaczenia jego temperatury na podstawie charakterystyki temperaturowej, która została zapisana w pamięci sterownika multimetru. Z uwagi na wymaganą rozdzielczość i dokładność pomiary rezystancji są wykonywane w układzie czterozaciskowym [6,7].

W przypadku termopar struktura toru pomiarowego jest bardziej złożona - rys. 1. Sygnał napięciowy z termopary, poprzez blok kompensacji zimnych końców i wzmacniacz prądu stałego A, jest podawany na wejście  $A_{IN1}$  przetwornika A/C. Przetwornik sigma-delta typu AD7710 wykazuje rozdzielczość 21bitów, a więc większą niż jest wykorzystywana przy pomiarach wielkości elektrycznych [6,7]. Wejście  $A_{IN2}$  przetwornika A/C współpracuje z układem kompensacji zimnych końców. Rozdzielenie pomiarów sygnału z termopary i sygnału zależnego od temperatury zimnych końców umożliwia, w sposób programowy, dostosowanie toru pomiarowego do pomiaru ośmiu typów termopar.

Cykl pomiaru temperatury za pomocą dołączonej do wejścia multimetru termopary jest realizowany zgodnie z programem zapisanym w stałej pamięci sterownika przyrządu i obejmuje następujące fazy:

1. Pomiar napięcia na rezystorze Pt100 i obliczenie na tej podstawie temperatury bloku kompensacji zimnych końców;
2. Wykorzystując charakterystykę termometryczną termopary  $f(t)$ , dla obliczonej temperatury bloku kompensacji zimnych końców ustala się wartość napięcia spiny odniesienia dołączonej do multimetru termopary pomiarowej ( $U_2$ );
3. Pomiar napięcia termopary pomiarowej ( $U_1$ ) i obliczenie sumy napięć  $U_w = U_1 + U_2$ ; odpowiadającej temperaturze spiny pomiarowej;
4. Wykorzystując odwrotną charakterystykę termometryczną termopary  $F(U)$ , napięcie  $U_w$  przelicza się na wartość temperatury spiny pomiarowej;
5. Obliczoną wartość temperatury koryguje się zgodnie ze współczynnikami kalibracyjnymi zapisanymi w pamięci przyrządu, wyświetla na polu odczytowym i wysyła do złącza interfejsowych multimetru.

<sup>1</sup>Przyrząd opracowany w Przemysłowym Instytucie Elektroniki w ramach projektu badawczego nr T10C04799C/4722 finansowanego przez KBN jest wdrażany do produkcji w OBR „Metrol” w Zielonej Górze.



Rys.1. Struktura toru do pomiaru temperatury za pomocą termopary.

Charakterystyki termometryczne termopar  $f(t)$  i charakterystyki odwrotne  $F(U)$  są określane w dokumentach normalizacyjnych za pomocą wielomianów wysokiego stopnia. Bezpośrednie wykorzystywanie tych wielomianów do obliczeń w czasie rzeczywistym za pomocą ograniczonych środków techniki obliczeniowej, wbudowanych do multimetru, jest mało realne. Dlatego w opracowywanym przyrządzie wykorzystano metodę odcinkowej interpolacji termometrycznych funkcji odwrotnych za pomocą wielomianów trzeciego stopnia, dobrze przystosowanych do realizacji szybkich obliczeń numerycznych [1,2,3]. W przypadku funkcji  $f(t)$  zastosowano również interpolację za pomocą wielomianu trzeciego stopnia. Z uwagi na niewielki stosunkowo zakres zmian temperatury bloku odniesienia ograniczono się do jednego odcinka. Dla poszczególnych typów termopar maksymalne błędy realizowanego w multimetrze odwzorowania nominalnych charakterystyk określonych normą PN-EN 60584-1 nie przekraczają 0,01...0,015 °C [2,3].

### 3. ANALIZA DOKŁADNOŚCI

Na podstawie przedstawionych rozważań wynika, że pomiar temperatury przez multimetr cyfrowy wymaga szeregu pomiarów pośrednich, a następnie wiąże się z cyfrową obróbką tych wyników. Podstawowe zależności opisujące proces pomiaru temperatury za pomocą multimetru cyfrowego są następujące:

$$t_w = F(U_t) \quad (1)$$

$$U_t = U_1 + U_2 \quad (2)$$

$$U_2 = f(t_0) \quad (3)$$

$$t_0 = G(R_t) \quad (4)$$

gdzie:

$t_w$  – temperatura mierzona,

$f(t)$  – charakterystyka termometryczna termopary,

$F(U)$  – odwrotna charakterystyka termometryczna termopary,

$U_1$  – wartość napięcia termopary pomiarowej na zaciskach przyrządu,

$U_2$  – wartość napięcia spiny odniesienia termopary pomiarowej.

$t_0$  – temperatura odniesienia,

$G(R)$  – odwrotna charakterystyka termometryczna termorezystora,

$R_t$  – rezystancja termorezystora

Dokładna analiza modelu opisującego pomiar temperatury przez multimetr cyfrowy jest złożona. Zależności: (1), (3) i (4) są nieliniowe [2,4,5]. Multimetr cyfrowy umożliwia pomiar napięcia  $U_1$  z dużą dokładnością. Również błędy odwzorowania charakterystyk  $F(U)$ ,  $f(t)$  i  $G(R)$  są niewielkie [2,3,7]. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie temperatur  $t_0$  i  $t_w$  ze stosunkowo dużą dokładnością. W dalszych rozważaniach założono, że wartości nominalne temperatury mierzonej i temperatury odniesienia są parametrami, a przyrosty tych wielkości są zmiennymi. Wówczas przy ograniczonych wartościach tych zmiennych można przyjąć, że badany układ jest liniowy.

Uwzględniając powyższe założenia można, na podstawie zależności (1) i (2), błąd bezwzględny wyznaczenia temperatury  $\delta t_w$  przedstawiać w postaci:

$$\delta t_w = F'(U_w)\delta U_1 + F'(U_w)\delta U_2 \quad (5)$$

gdzie:

$F'(U_w)$  – pochodna funkcji  $F(U)$  dla  $U=U_w$

$\delta U_1, \delta U_2$  – błędy bezwzględne napięć  $U_1, U_2$

Błąd  $\delta U_2$  może być wyznaczony z zależności:

$$\delta U_2 = f'(t_0) \delta t_0 \quad (6)$$

gdzie:

$f'(t_0)$  – pochodna funkcji  $f(t)$  dla  $t=t_0$

W przypadku funkcji  $F(U)$  i  $f(t)$  obowiązuje zależność:

$$F'(U) = 1/f'(t) \quad (7)$$

Podstawiając zależności (6) i (7) do zależności (5) otrzymano:

$$\delta t_w = \delta t_0 f'(t_0) / f'(t_w) + \delta U_1 / f'(t_w) \quad (8)$$

Pierwsza składowa błędów zależy od niedokładności wyznaczenia temperatury zimnych końców  $t_0$  i wartości pochodnej funkcji  $f(t)$  w punktach  $t=t_0$  i  $t=t_w$ . Łatwo zauważyć, że pochodna funkcji  $f(t)$  odpowiada wartościom współczynników Seebeck'a termopar [2,3,5]. Na podstawie zależności współczynników Seebeck'a od temperatury wynika, że dla większości typów termopar wyrażenie  $f'(t_0) / f'(t_w)$  osiąga wartość maksymalną przy temperaturach mierzonych równych wartościom minimalnym. Dla przykładu dla termopary typu J dla temperatur: -200°C, 0°C, 1000°C wartości

spółczynników Seebeck'a są odpowiednio równe:  $22\mu V / ^\circ C$ ,  $50\mu V / ^\circ C$ ,  $60\mu V / ^\circ C$ . Oznacza to, że przy pomiarach niskich temperatur należy się liczyć ze zwiększonym wpływem błędu  $\delta t_0$  na dokładność pomiaru. Błąd pomiaru temperatury zimnych końców termopary zależy od:

- Różnicy temperatur zacisków wejściowych i czujnika rezystancyjnego,
- Tolerancji zastosowanego termorezystora,
- Błędów pomiaru rezystancji czujnika.

W multimetrze zastosowano czujnik miniaturowy klasy B, który przy temperaturze otoczenia  $30^\circ C$  wykazuje tolerancję na poziomie  $0,5^\circ C$ . Czujnik ten, umieszczony w pobliżu zacisków gniazda pomiarowego termopar, otoczony jest dodatkowym ekranem cieplnym. W warunkach ustalonych różnica temperatur zacisków wejściowych i czujnika nie przekracza  $0,3^\circ C$ . Błąd pomiaru rezystancji czujnika, zależny od błędu rezystora wzorcowego i błędu napięcia wzorcowego, można oszacować na 1%. Przy temperaturze otoczenia czujnika  $30^\circ C$  błąd bezwzględny pomiaru rezystancji nie przekracza  $1,1\Omega$ , co odpowiada błędowi temperatury około  $2,5^\circ C$ .

Druga składowa błędu temperatury zależy od błędu pomiaru napięcia  $U_j$  i wartości pochodnej funkcji  $f'(t_w)$ . W rozważanym multimetrze błąd pomiaru napięcia stałego nie przekracza wartości [6,7]:

$$\delta U_j = 0,01\% U_j + 0,002\% U_n$$

gdzie:

$U_j$  – wartość mierzona,

$U_n$  – wartość maksymalna zakresu.

Dla wybranej termopary i zadanej temperatury mierzonej można na podstawie tablic termopar oszacować wartość napięcia  $U_j$ , a następnie wyznaczyć wartość błędu  $\delta U_j$ . W praktyce wpływ drugiej składowej błędu pomiaru temperatury nie przekracza:  $0,2^\circ C$  - dla termopar typów:

E, J, K i T, lub  $0,5^\circ C$  – dla termopar typów: B, R, S.

Aby zmniejszyć błąd pomiaru temperatury multimetr wyposażono w dodatkową procedurę kalibracyjną, która pozwala istotnie ograniczyć wpływ błędu temperatury odniesienia. Dla przykładu dla termopary typu J uzyskano dokładność pomiaru lepszą niż  $0,2^\circ C$ .

#### 4. WYNIKI DOŚWIADCZALNE

Opracowany w Przemysłowym Instytucie Elektroniki multimetr cyfrowy typu DM22 umożliwia wykonanie dokładnych pomiarów temperatury przy wykorzystaniu zewnętrznych czujników: termopar lub termorezystorów. Badania dotyczyły toru do pomiaru temperatury przy wykorzystaniu termopar. W pierwszej części zbadano wpływy niedokładności wzmocnienia toru napięcia stałego multimetru i błędu temperatury odniesienia na dokładność pomiaru temperatury. Symulacja błędu wzmocnienia wynosiła  $0,1\%$  (składowa multiplikatywna błędu wzmocnienia), a symulacja błędu temperatury odniesienia była równa  $2,8^\circ C$ . Pomiary wykonano dla termopary typu J. Wyniki pomiarów przedstawiono w tablicach 1 – 3. Temperaturę wzorcową  $t_n$  symulowano za pomocą kalibratora typu 5500 firmy Fluke, a temperaturę mierzoną  $t_w$  odczytywano z badanego multimetru DM22. W tablicy 4 przedstawiono wpływ błędu temperatury odniesienia równego  $2,8^\circ C$  na dokładność pomiaru w przypadku zastosowania dodatkowej autokalibracji multimetru.

W części drugiej zbadano dokładność pomiaru multimetru, który był uprzednio poddany procedurom kalibracyjnym. Pomiary temperatury, przedstawione w tablicach 5 – 7, dotyczą termopar typów B, R i E.

Tab. 1. Wpływ błędu wzmocnienia toru na dokładność pomiaru multimetru

$t_n$	$^\circ C$	-200	-100	0	100	200	500	1000
$t_w$	$^\circ C$	-199,66	-99,83	0,00	99,91	199,74	499,47	999,03

Tab. 2. Wpływ błędu temperatury odniesienia na dokładność pomiaru multimetru

$t_n$	$^\circ C$	-200	-100	0	100	200	500	1000
$t_w$	$^\circ C$	-206,83	-103,45	-2,82	97,35	197,33	497,40	997,56

Tab. 3. Wpływ łączny błędów: wzmocnienia toru i temperatury odniesienia na dokładność pomiaru multimetru

$t_n$	$^\circ C$	-200	-100	0	100	200	500	1000
$t_w$	$^\circ C$	-206,49	-103,35	-2,80	97,30	197,15	496,92	996,60

Tab. 4. Wpływ błędu temperatury odniesienia na dokładność pomiaru po dodatkowej autokalibracji multimetru

$t_n$	$^\circ C$	-200	-100	0	100	200	500	1000
$t_w$	$^\circ C$	199,92	-99,92	0,04	100,06	199,97	500,01	1000,04

Tab.5. Pomiary temperatury przy wykorzystaniu termopary typu B

$t_n$	°C	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
$t_w$	°C	599,87	799,92	999,95	1199,96	1399,98	1599,92	1799,96

Tab. 6. Pomiary temperatury przy wykorzystaniu termopary typu R

$t_n$	°C	0	100	200	600	1000	1500	1700
$t_w$	°C	0,18	100,06	200,16	600,15	1000,09	1500,09	1700,11

Tab. 7. Pomiary temperatury przy wykorzystaniu termopary E

$t_n$	°C	0	100	200	400	600	900
$t_w$	°C	0,22	100,21	200,85	400,20	600,18	900,05

## 5. PARAMETRY MULTIMETRU

Przeprowadzone badania prototypu pozwoliły określić zakresy pomiarowe i dokładność multimetru DM22. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 8.

Tab.8. Parametry multimetru cyfrowego DM22

Przedmiot pomiaru	Zakres pomiaru	Dokładność pomiaru
Napięcie stałe	0,1μV ... 1000V	± 0,01%
Napięcie zmienne	1μV ... 750V	± 0,1%
Rezystancja	1mΩ ... 19,9999MΩ	± 0,02%
Prąd stały	1μA ... 1,99999A	± 0,05%
Prąd zmienny	1μA ... 1,99999A	± 0,2%
Temperatura (termorezystory: Pt100, Pt1000)	-200°C... +600°C	± 0,2°C
Temperatura (termopary: B, E, J, K, N, R, S, T)	Zależny od termopary	± 0,2°C ... ± 1,5°C (zależnie od termopary)
Wilgotność względna	Zależny od przetwornika	Zależna od przetwornika

## LITERATURA

- [1] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: *Metody numeryczne*. PWN, Warszawa 1993, str. 24-63.
- [2] Jackiewicz B.: *Metoda linearyzacji charakterystyk termopar w multimetrze cyfrowym*. Krajowy Kongres Metrologii, KKM'2001, Warszawa, 2001, str. 105-108.
- [3] Jackiewicz B.: *Realizacja dokładnych pomiarów temperatury za pomocą multimetru cyfrowego*. V SZKOŁA KONFERENCJA, Metrologia wspomagana komputerowo, MWK' 01, Warszawa-Zegrze, Tom III, str. 67-72.
- [4] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: *TERMOMETRIA, Przyrządy i metody*. Politechnika Łódzka, Łódź 1998.
- [5] *Omega Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia*. Vol. 30, s.Z1...Z20 Omega Engineering, USA, 2000
- [6] Studziński P.: *Nowy multimetr cyfrowy do pomiarów wielkości nieelektrycznych*. Zeszyty naukowe Politechniki Łódzkiej ELEKTRYKA nr 99, XXXIII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, MKM'2001, Łódź, 2001, str. 75-80.
- [7] Studziński P., Reska D.: *Multimetr cyfrowy do dokładnych pomiarów temperatury*. Elektronizacja nr 10/2001.

Artykuł recenzowany.