

Otylia Brandys  
Eligiusz Pasecki  
Instytut Metrologii  
i Maszyn Elektrycznych

## UKŁAD DO POMIARU GRADIENTÓW TEMPERATUR

Streszczenie. Stosując uproszczenia w sposobie regulacji prądu, uzyskuje się proporcjonalną zależność pomiędzy mierzoną różnicą temperatur lub temperaturą bezwzględną i sygnałem wyjściowym w układzie niezrównoważonego mostka czteroramiennego z czujnikami termooporowymi. Podane są podstawowe zależności umożliwiające ocenę błędów metody pomiarowej.

### 1. Wstęp

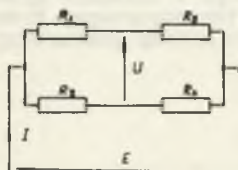
Obiektywna ocena mikroklimatu, w szczególności w ośrodkach wielkomiej-  
skich, wymaga poznania rozkładu temperatur w przyziemnych warstwach atmos-  
fery. Występujące w tym przypadku niewielkie różnice temperatur wymagają  
zastosowania do tego celu szczególnie czułej metody pomiarowej. Ponadto sto-  
sunkowo szybkie zmiany rozkładu temperatury wymagają równoczesnego po-  
miaru temperatury na różnych poziomach w bardzo wielu punktach obszaru.  
W przypadku równoczesnego pomiaru temperatury w całym badanym obszarze mo-  
gą być stosowane do tego celu przyrządy o stosunkowo dużej stałej czasow-  
wej, na przykład termometry rtęciowe. Taka metoda pomiaru rozkładu tempe-  
ratur jest jednak bardzo pracochłonna i kosztowna.

Jeżeli pomiar temperatury na różnych poziomach w różnych punktach ob-  
szaru zostanie wykonany w krótkich odstępach czasu, to uzyskany obraz roz-  
kładu temperatur tego obszaru będzie bardzo zbliżony do rzeczywistego. Ta-  
ka metoda pomiaru gradientów temperatur wymaga zastosowania przyrządu po-  
miarowego o małej stałej czasowej. Optymalna w tym przypadku stała czasow-  
wa czujnika pomiarowego jest rzędu kilku sekund, aby uniezależnić wynik  
pomiaru od fluktuacji temperatury spowodowanej drganiem i podmuchami po-  
wietrza. Biorąc pod uwagę, że pomiary mogą być wykonywane w różnych po-  
rach roku, przyrząd powinna cechować poprawna praca w zakresie temperatur  
od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+40^{\circ}\text{C}$ , duża odporność na wstrząsy i wpływy atmosferyczne.  
Ponadto przyrząd powinna charakteryzować duża pewność działania, prosta ob-  
sługa, mały ciężar i wymiary, zasilanie bateryjne oraz duża dokładność po-  
miaru.

Spośród znanych metod pomiarowych temperatury, realizacja techniczna układu pomiarowego, spełniającego wyżej wymienione wymagania, może być oparta o układ niezrównoważonego czteroramiennego mostka z termooporowymi czujnikami pomiarowymi.

## 2. Pomiar różnicy temperatur

Napięcie nierównowagi mostka czteroramiennego w zależności od napięcia lub prądu zasilania mostka i rezystancji w gałęziach mostka (rys.1) określają następujące wyrażenia:



$$U = E \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 R_2 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_3 R_4} \quad (1)$$

$$U = I \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (2)$$

Rys. 1. Rezystancyjny mostek do pomiaru różnicy temperatur i temperatury bezwzględnej

Stosując dwa termooporowe czujniki pomiarowe w dwu sąsiednich gałęziach mostka oraz zakładając, że równowaga mostka występuje przy równości rezystancji we wszystkich gałęziach mostka dla zadanej temperatury  $t_0$  czujników, wyrażenie (1) i (2) przyjmują postać

$$U = \frac{E}{\frac{4}{\alpha} + 4(t - t_0) + \alpha(t - t_0)^2 - \alpha(t - t_0)\Delta t - 2\Delta t} \Delta t \quad (3)$$

$$U = \frac{IR}{\frac{4}{\alpha} + 2(t - t_0) - \Delta t} \Delta t, \quad (4)$$

gdzie

$$\Delta t = t - t_1,$$

$t$  - temperatura czujnika  $R_2$ ,

$t_1$  - temperatura czujnika  $R_1$ ,

$\alpha$  - temperaturowy współczynnik rezystancji czujników  $R_1$  i  $R_2$ ,

$t_0$  - temperatura zadana czujników  $R_1$  i  $R_2$ ,

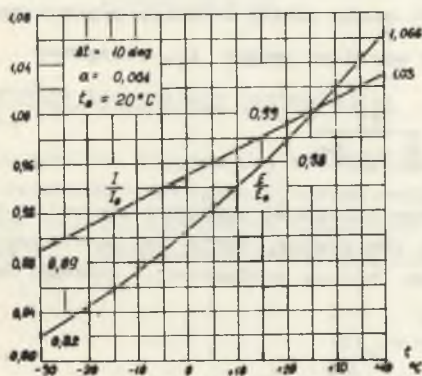
$$R = R_3 = R_4 = R_0$$

$R_0$  - rezystancje czujników  $R_1$  i  $R_2$  dla temperatury  $t_0$ .

Chcąc otrzymać proporcjonalną zależność pomiędzy napięciem  $U$  nierównowagi mostka oraz mierzoną różnicą temperatur  $\Delta t$ , należy zmieniać wartości napięcia  $E$  lub prądu  $I$  zasilania mostka, w zależności od temperatury czujników. Oznaczając przez  $E_0$  i  $I_0$  napięcie lub prąd zasilania mostka dla  $\Delta t = 0$  i  $t = t_0$ , otrzymamy

$$\frac{E}{E_0} = 1 + \alpha(t - t_0) + \frac{\alpha^2}{4}(t - t_0)^2 - \frac{\alpha^2}{4}(t - t_0)\Delta t - \frac{\alpha}{2}\Delta t \quad (5)$$

$$\frac{I}{I_0} = 1 + \frac{\alpha}{2}(t - t_0) - \frac{\alpha}{4}\Delta t. \quad (6)$$



Rys. 2. Względne zmiany napięcia i prądu zasilania mostka

Z wzorów (5) i (6) wynika, że w ogólnym przypadku zarówno napięcie, jak i prąd zasilania mostka powinien być zmieniany w funkcji zmian temperatury  $t$  czujnika  $R_2$  i mierzonej różnicy temperatur  $\Delta t$ . Rys. 2 przedstawia względne zmiany napięcia i prądu zasilania mostka w funkcji temperatury  $t$  przy stałej różnicy temperatur  $\Delta t = 10$  deg oraz danych:  $\alpha = 0,004$  i  $t_0 = +20^\circ\text{C}$ . Realizacja techniczna układu z regulacją prądu jest znacznie prostsza niż układu z regulacją napięcia. Dlatego dalej zostanie przeprowadzona analiza układu mostka nierównoważonego o regulowanej wartości prądu zasilania mostka.

Przekształcając wyrażenie (6) otrzymamy

$$I = I_0 \left[ 1 + \frac{\alpha}{2}(t - t_0) \right] - \frac{U}{R}. \quad (7)$$

Po podstawieniu zależności (7) do wyrażenia (4), otrzymamy

$$U = \frac{\alpha}{4} R I_0 \Delta t. \quad (8)$$

Realizacja techniczna układu spełniającego zależności (7) i (8) jest możliwa przez wprowadzenie sprzężenia zwrotnego pomiędzy wartością sygnału wyjściowego oraz wartością rezystancji czujnika  $R_2$ , a prądem zasilania mostka. W tym przypadku pomiar różnicy temperatur jest pozbawiony błędów metody pomiarowej.

Pomińmy w wyrażeniu (7) czynnik  $\frac{U}{R}$ . Oznacza to, że prąd zasilania mostka uzależniamy tylko od temperatury bezwzględnej  $t$  (temperatury czujnika  $R_2$ ), czyli

$$I_1 = I_0 \left[ 1 + \frac{\alpha}{2} (t - t_0) \right]. \quad (9)$$

Po dokonaniu przekształceń wyrażenia (4) i podstawieniu do (4) wartości prądu wynikającej z równania (9), otrzymamy

$$U = I_0 R \frac{\Delta t}{\frac{4}{\alpha} - \Delta t \frac{I_0}{I_1}}. \quad (10)$$

Przyjmując, że  $\frac{I_0}{I_1} = a$  posiada wartość stałą równą średniej arytmetycznej wynikającej z maksymalnej i minimalnej wartości prądu  $I_1$ , otrzymamy

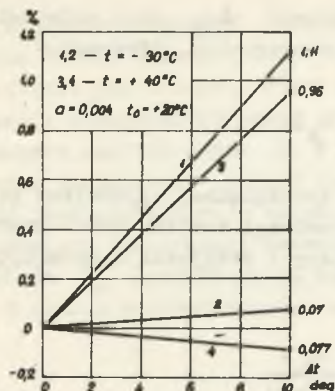
$$U_1 = I_0 R \frac{\Delta t}{\frac{4}{\alpha} - a \Delta t}. \quad (11)$$

W tym przypadku uzyskujemy nieliniową zależność pomiędzy napięciem nierównowagi mostka oraz mierzoną różnicą temperatur. Wynik pomiaru uzyskany z zależności (11) jest obarczony błędem metody pomiarowej, którego wartość wynosi

$$\left( \frac{\Delta U}{U} \right)_1 = 1 - \frac{\frac{4}{\alpha} - \frac{\Delta t}{1 + \frac{\alpha}{2}(t - t_0)}}{\frac{4}{\alpha} - a \Delta t}. \quad (12)$$

Uczynimy obecnie dalsze uproszczenia w sposobie przeprowadzenia pomiaru różnicy temperatur. Pomijamy czynnik  $\Delta t$  występujący w mianowniku wyrażenia (4) oraz podstawiamy do wzoru (4) wartość prądu wynikającą z wyrażenia (9). Uzyskamy wówczas proporcjonalną zależność pomiędzy napięciem nierównowagi mostka oraz mierzoną różnicę temperatur. Zależność tę określa wyrażenie (8). W tym przypadku błąd metody pomiarowej wynosi

$$\left( \frac{\Delta U}{U} \right)_2 = \frac{\Delta t}{\frac{4}{\alpha} + 2(t - t_0)}. \quad (13)$$



Rys.3. Błąd metody pomiarowej wynikający z uproszczeń regulacji prądu zasilania mostka

Na rysunku 3 przedstawiona jest zależność błędów metody pomiarowej wynikających z wyrażeń (12) - krzywe 2 i 4 i (13) - krzywe 1 i 3, dla danych:  $\alpha = 0,004, t_0 = +20^\circ\text{C}, t = -30^\circ\text{C}$  oraz  $t = +40^\circ\text{C}$ . Z przedstawionych krzywych wynika, że błąd metody pomiaru wynikający z przyjęcia upraszczających pomiar założeń nie przekracza 1,2%.

### 3. Pomiar temperatury bezwzględnej

Do pomiaru temperatury bezwzględnej może być również wykorzystany układ czteroramiennego mostka niezrównoważonego. Dokonamy w tym celu podziału całego zakresu mierzonych temperatur na  $n$  podzakresów oraz oznaczymy przez  $t_k$  temperaturę początkową każdego podzakresu.

$$\Delta t_k = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n} \quad (14)$$

$$t = t_k + \Delta t_k \quad (15)$$

Niech w układzie mostka czteroramiennego przedstawionego na rys. 1 rezystancja  $R_2$  będzie zależna od temperatury (czujnik termoporowy) oraz dla temperatury zadanej  $t_0$  występuje równowaga mostka przy równości rezystancji we wszystkich gałęziach mostka. Przez zmianę wartości rezystancji  $R_1 = R_k$  doprowadzimy mostek do równowagi dla temperatury początkowej  $t_k$  każdego podzakresu. Wynika stąd, że

$$R_k = R [1 + \alpha(t_k - t_0)] \quad (16)$$

Na podstawie wyżej przyjętych założeń oraz zależności (2), (15) i (16), otrzymujemy

$$U = IR \frac{\Delta t_k}{\alpha + 2(t - t_0) - \Delta t_k} \quad (17)$$

Pomijając w mianowniku wyrażenia (17) czynnik  $\Delta t_k$  oraz podstawiając do wyrażenia (17) wartość prądu wynikającą z wzoru (9), otrzymamy

$$U = \frac{\alpha}{4} R I_0 (t - t_k). \quad (18)$$

Również w przypadku pomiaru temperatury bezwzględnej uzyskujemy proporcjonalną zależność pomiędzy napięciem nierównowagi mostka oraz mierzoną temperaturą. Błąd metody pomiarowej wynikający z przyjęcia upraszczających założeń określa wyrażenie

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{t - t_k}{\frac{\alpha}{4} + 2(t - t_0)} \quad (19)$$

i dla  $t - t_k \leq 10$  deg nie przekracza 1,2% w całym zakresie mierzonych temperatur.

#### 4. Układ pomiarowy

Pomiar różnicy temperatur oraz temperatury bezwzględnej realizowany jest w układzie przedstawionym na rys. 4. Napięcie nierównowagi mostka jest mierzone za pomocą miernika magnetoelektrycznego oraz wzmacniacza o rezystancji wejściowej znacznie większej niż rezystancja wyjściowa mostka. Silne ujemne sprzężenie zwrotne wzmacniacza zapewnia, że napięcie na wyjściu układu pomiarowego może być określone z zależności

$$U_m = U \frac{R_4 + R_5}{R_4}. \quad (20)$$

Ponadto wstępne zerowanie układu pomiaru napięcia nierównowagi mostka zrównoważonego (przełączniki  $P_1$  i  $P_2$  w pozycji 0) powoduje, że o dokładności pomiaru napięcia nierównowagi decyduje w zasadzie klasa dokładności zastosowanego miernika wyjściowego.

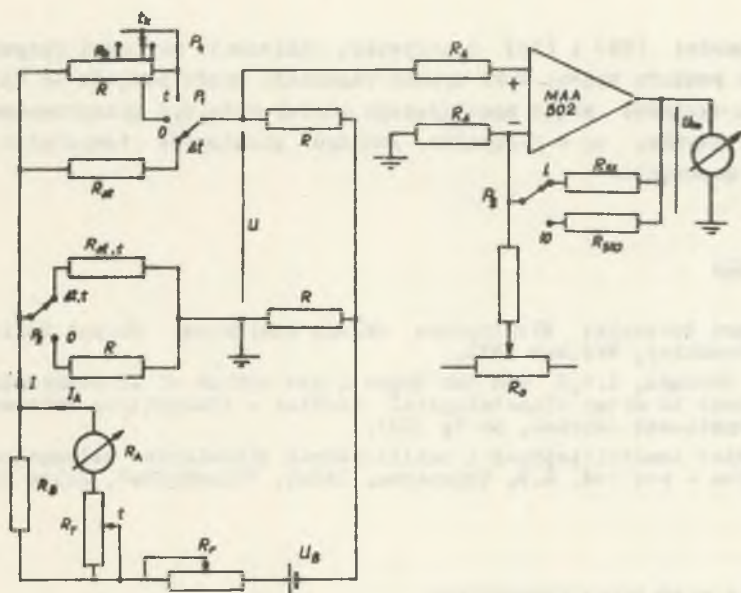
Pomiar różnicy temperatur  $\Delta t$  jest dokonywany w dwóch podzakresach: 1 deg i 10 deg, wybieranych przełącznikiem  $P_3$  przez zmianę rezystancji  $R_5$  w gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza. Czujniki termoporowe włączane są w sąsiednie gałęzie mostka przełącznikami  $P_1$  i  $P_2$ . Trójprzewodowe połączenie czujników z mostkiem eliminuje wpływ przewodów łączących na dokładność pomiaru.

Do pomiaru temperatury bezwzględnej wykorzystuje się jeden czujnik termoporowy. Podzakres pomiaru temperatury wybierany jest przełącznikiem  $P_4$  którym zmieniamy wartość rezystancji w jednej z gałęzi mostka.

Z przeprowadzonych poprzednio rozważań wynika, że wartość prądu zasilania mostka musi być znana oraz regulowana w zależności od temperatury czujników pomiarowych. W tym celu w gałęzi zasilania mostka zastosowano miernik magnetoelektryczny oraz opornik regulowany  $R_T$ , którym nastawiamy wymaganą wartość prądu  $I$ . W celu uproszczenia przebiegu pomiaru prądu  $I$  został zastosowany opornik regulowany  $R_T$  wyskalowany w  $^{\circ}\text{C}$ , którego wartość jest nastawiana w zależności od temperatury czujnika przeznaczonego do pomiaru temperatury bezwzględnej (temperatura otoczenia). Za pomocą opornika  $R_T$  nastawiamy tę samą, raz wybraną, wartość prądu  $I_A$ .

Z układu przedstawionego na rys. 4 wynika, że

$$R_T = R_B \left( \frac{I}{I_A} - 1 \right) - R_A. \quad (21)$$



Rys. 4. Układ do pomiaru różnicy temperatur i temperatury bezwzględnej

Jeżeli założymy, że dla  $t = t_{\min}$  rezystancja  $R_T = 0$ , to po podstawieniu wyrażenia (9) do (21) otrzymamy

$$R_T = R_A \frac{\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{I_0}{I_k} (t - t_{\min})}{\frac{I_0}{I_A} \left[ 1 + \frac{\alpha}{2} (t_{\min} - t_0) \right] - 1} \quad (22)$$

$$R_B = \frac{R_A}{\frac{I_0}{I_A} \left[ 1 + \frac{\alpha}{2} (t_{\min} - t_0) \right] - 1} \quad (23)$$

Zależności (22) i (23) umożliwiają obliczenie wartości rezystancji w układzie pomiaru prądu. Taki sposób regulacji prądu posiada tę zaletę, że korekcja wartości prądu zasilającego mostek może być przeprowadzona stosunkowo szybko, co w przypadku pomiaru gradientów temperatur posiada istotne znaczenie.

#### LITERATURA

1. Ryszard Gotszalk: Elektryczne układy pomiarowe. Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1973.
2. L.A. Conrads, J.C.H. van der Hage: A new method of air-temperature measurement in urban climatological studies - Atmospheric Environment an International Journal, nr 8; 1971.
3. Rascziot izmiritielnych i usilitielnych eliemientow awtomatyczieskich sistiem - pod red. N.M. Czumakowa. Izdat. "Tiechnika", Kijew 1971.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

##### Резюме

Применяя упрощение в способе регуляции тока получаем пропорциональную зависимость между измеряемой разницей температур или абсолютной температурой и выходным сигналом в схеме неуравновешенного четырехвечного моста с термосопротивлением. Поданы основные зависимости для оценки погрешности измерительного метода.



## SYSTEM FOR MEASURING THE TEMPERATURE GRADIENT

## S u m m a r y

Making the simplifications in the method of current regulation, proportional relation between the measured difference of temperatures or absolute temperature and output signal in the out of balance four armed bridge circuit with resistance thermometer is obtained.

The main relations evaluating the error of the method of measurement are given.