

Andrzej DRWAL, Sławomir ŻABA  
Samodzielna Pracownia Elektroniki Politechniki Krakowskiej  
Jan KIEŁBASA  
Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk

## ANEMOMETR SKOMPENSOWANY TEMPERATUROWO

**Streszczenie.** Artykuł zawiera opis nowego układu do pomiaru prędkości przepływu - anemometru skompensowanego temperaturowo o liniowo narastającym napięciu zasilania i algorytm programu sterującego jego pracą.

## TEMPERATURE COMPENSATED ANEMOMETER

**Summary.** The paper presents the description of a new flow velocity measurement setup - i.e. temperature compensated anemometer whose supply voltage rises in a linear way. An algorithm for a control program is presented in the paper as well.

### 1. WPROWADZENIE

W pomiarach przepływów często przepływające medium zmienia swoją temperaturę. Jeżeli pomiaru prędkości dokonuje się sondami z grzonym włóknem, to wskazania anemometru są w takim przypadku obciążone znacznym błędem. Zwykle stosuje się wówczas drugi czujnik umieszczony w pobliżu włókna termooanemometrycznego, który mierzy temperaturę strumienia, a znając ją, wprowadza się odpowiednią korekcję do wskazań termooanemometru. Powstają tu dodatkowe trudne problemy, gdy czujnik temperaturowy musi być przestrzennie rozdzielony z sondą termooanemometryczną, a więc mierzy temperaturę strumienia w innym punkcie niż grzane włókno. Z drugiej strony nie można go umieścić zbyt blisko, gdyż nastąpiłby efekt oddziaływania cieplnego włókna anemometru na włókno termometru. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że sondy anemometryczna i termometryczna mają różne stałe czasowe, a więc różną dynamikę pracy.

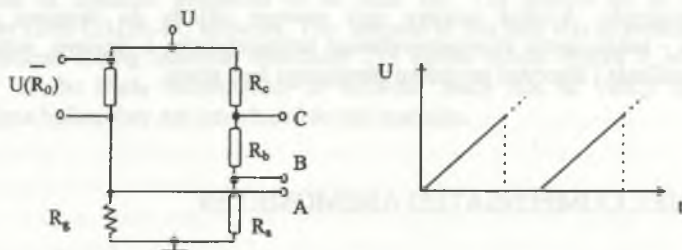
Autorzy wykorzystując wcześniejszą propozycję przedstawioną w pracach [1, 2, 3] proponują inne rozwiązanie anemometru skompensowanego temperaturowo. W tym rozwiązaniu grzane włókno jest cyklicznie zasilane napięciem narastającym liniowo w czasie. Rezystancja  $R_s$  grzanego włókna zmienia się wraz z prądem od wartości  $R_0$  do wartości  $R_k$  w sposób monotoniczny.

Z tego zbioru (za pomocą mostka Wheatstone'a - patrz rys. 1) wybiera się dwie rezystancje  $R_1$  i  $R_2$ , do których przynależą prądy zasilania  $I_1$  i  $I_2$ . Dla obu tych stanów możemy wypisać równania Kinga

$$R_1 I_1^2 = (a + bv^m)(T_1 - T_s) \quad (1)$$

oraz

$$R_2 I_2^2 = (a + bv^m)(T_2 - T_s) \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat blokowy mostka anemometrycznego oraz kształt napięcia zasilającego  
Fig. 1. Anemometer's bridge and its supply voltage

Użyte tu nowe symbole oznaczają:  $R_s$  - rezystancja włókna anemometru „na zimno”, czyli w temperaturze strumienia;  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_s$  - temperaturę włókna w stanie 1 i w stanie 2, oraz temperaturę strumienia;  $v$  - prędkość przepływu strumienia;  $a$ ,  $b$  i  $m$  - są to stałe Kinga wyznaczone dla danego włókna podczas wzorcowania.

Przyjmuje się dla prostoty liniową zależność rezystancji włókna od temperatury. Dla obu stanów dostaje się:

$$R_1 = R_0[1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (3)$$

$$R_2 = R_0[1 + \alpha(T_2 - T_0)] \quad (4)$$

gdzie  $R_0$  jest rezystancją włókna w temperaturze odniesienia  $T_0$  na ogół różnej od temperatury strumienia  $T_s$ ,  $\alpha$  oznacza liniowy współczynnik zmian rezystancji włókna z temperaturą.

Odejmując stronami równanie (3) od (4) dostaje się:

$$\frac{R_2 - R_1}{\alpha R_0} = T_2 - T_1 \quad (5)$$

zaś odejmując stronami wzory (2) i (1) i podstawiając (5) dostaje się:

$$R_2 I_2^2 - R_1 I_1^2 = \frac{(a + bv^m)}{\alpha R_0} (R_2 - R_1) = \frac{R_2 - R_1}{\beta(v)} \quad (6)$$

gdzie

$$\beta(v) = \frac{\alpha R_0}{a + bv^m}. \quad (7)$$

Z zależności (6) wynika, że różnica mocy traconej przez grzane włókno w stanie pierwszym i drugim nie jest zależna od temperatury strumienia, a wyłącznie od jego prędkości.

Dzieląc ostatnie równanie obustronnie przez rezystancję włókna „na zimno”  $R_0$  otrzymuje się:

$$n_2 I_2^2 - n_1 I_1^2 = \frac{n_2 - n_1}{\beta(v)} \quad (8)$$

gdzie  $n_1$  i  $n_2$  są nastawianymi w mostku współczynnikami nagrzania włókna w stanie 1 i stanie 2. Współczynnik nagrzania włókna definiuje się jako stosunek rezystancji grzanego włókna do rezystancji włókna „na zimno”.

Równanie (7) można zapisać też jako

$$\frac{n_2 I_2^2 - n_1 I_1^2}{n_2 - n_1} = \frac{1}{\beta(v)} = \frac{a + bv^m}{\alpha R_0}, \quad (9)$$

a stąd prędkość przepływu wynosi

$$v = \sqrt[m]{\frac{1}{b} \left( \frac{\alpha R_0 (n_2 I_2^2 - n_1 I_1^2)}{n_2 - n_1} \right) - a}. \quad (10)$$

## 2. ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE PRACY UKŁADU

Analizowany anemometr pracuje w układzie przedstawionym na rys. 1. Źródło  $E$ , cyklicznie narastające liniowo, zasila mostek Wheatstone'a, w którego lewym ramieniu włączone jest włókno  $R_g$  zasilane poprzez rezystor  $R_0$ . W prawej gałęzi mostka znajduje się dzielnik złożony z rezystancji  $R_a$ ,  $R_b$  i  $R_c$ .

Narastające napięcie  $E(t)$  powoduje narastanie rezystancji włókna  $R_g$ , co z kolei wywołuje najpierw przejście przez zero napięcia na przekątnej A-B, a następnie to samo na przekątnej A-C.

W momentach kolejnych zrównoważeń mostka odczytuje się napięcie występujące na rezystancji  $\overline{R_0}$ , co faktycznie jest pomiarem prądu zasilania grzanego włókna. Z warunków równowagi mostka dla stanów 1 i 2 otrzymuje się:

$$n_1 R_0 (R_b + R_c) = \overline{R_0} R_a, \quad (11)$$

$$n_2 R_0 R_c = \overline{R_0} (R_a + R_b). \quad (12)$$

Z równań tych wyznacza się  $R_a$  i  $R_b$  zakładając, że  $\overline{R_0}$  i  $R_c$  są znane. Uzyskuje się zależności:

$$R_a = \frac{n_1 R_0 R_c (R_0 n_2 + R_0)}{R_0 n_1 R_0 + R_0}, \quad (13)$$

$$R_b = \frac{R_0 R_c (n_2 - n_1)}{n_1 R_0 + R_0}, \quad (14)$$

lub

$$R_a = R_c \frac{n_1 (n_2 \frac{R_0}{R_0} + 1)}{n_1 + \frac{R_0}{R_0}}, \quad (15)$$

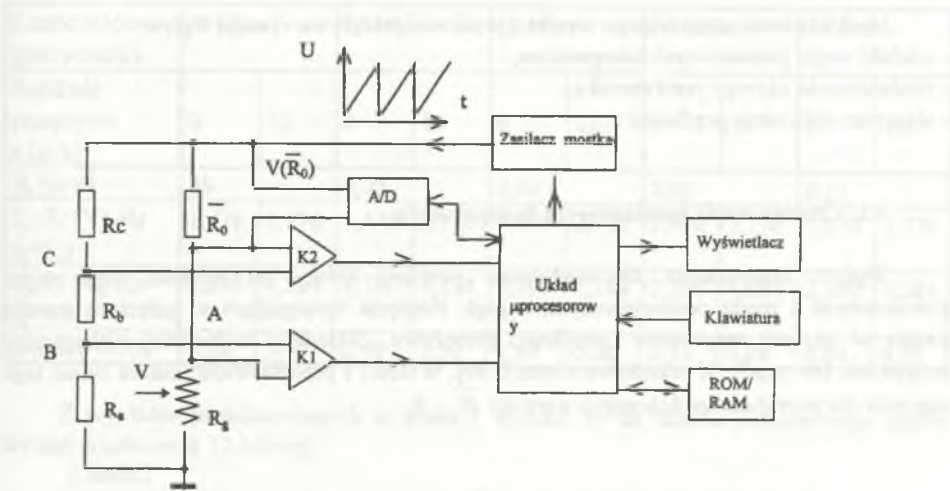
$$R_b = R_c \frac{n_2 - n_1}{n_1 + \frac{R_0}{R_0}}. \quad (16)$$

### 3. OPIS DZIAŁANIA UKŁADU MIKROPROCESOROWEGO

Schemat blokowy układu mikroprocesorowego przedstawia rys. 2. Cykl pomiarowy rozpoczyna mikroprocesor wysyłając impuls inicjujący do zasilacza mostka i przetwornika A/D. Zasilacz mostka rozpoczyna wytwarzanie liniowo narastającego napięcia od wartości zerowej. Zrównanie napięć na rezystorze  $R_a$  i anemometrze  $R_g$  (punkt 1 na rys. 3) jest sygnalizowane przez komparator K1 wysłaniem impulsu do układu mikroprocesorowego. Wówczas mikroprocesor zapamiętuje aktualnie przesyłaną informację z przetwornika A/D (napięcie  $U(\overline{R_0})$ ). Znając wartość rezystora  $\overline{R_0}$  uzyskujemy wartość prądu  $I_{A1}$ .

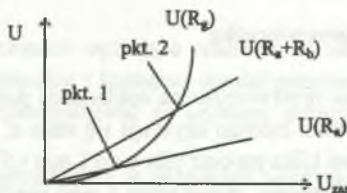
Z kolei zrównanie napięć w punktach C i A (punkt 2 na rys. 3) sygnalizuje komparator K2, a układ mikroprocesorowy zapamiętuje aktualnie przesłaną informację z przetwornika

A/D. W wyniku tej operacji otrzymuje się (pośrednio) wartość prądu  $I_{A2}$ . Układ mikroprocesorowy ze wzoru (10) oblicza wartość prędkości i przedstawia ją na wyświetlaczu.



Rys. 2. Schemat blokowy mikroprocesorowego układu sterowania anemometru skompensowanego temperaturowo o liniowo narastającym prądzie zasilania  
 Fig. 2. Block diagram of microprocessor controlled anemometer with ramp shaped supply voltage

W zależności od wybranego trybu pracy układ mikroprocesorowy, po zakończonym cyklu pomiarowym, wysyła ponownie impuls inicjujący do zasilacza mostka i procedura pomiarowa zostaje powtórzona (praca w pętli programowej) lub też kolejna procedura pomiarowa rozpoczyna się na życzenie użytkownika (podanie sygnału z klawiatury).



Rys. 3. Przebiegi napięć w gałęziach mostka w funkcji napięcia zasilającego (w jednym cyklu pomiarowym)  
 Fig. 3. Voltages of bridge arms as a function of supply voltage (during one measurement cycle)

#### 4. ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW

Na dokładność otrzymanego wyniku (prędkości przepływu  $v$ ) mają wpływ:

- czułość wejść pomiarowych komparatora,
- rozdzielczość użytego przetwornika,
- algorytm obliczania prędkości  $v$ .

##### 4.1. Czułość wejść pomiarowych komparatora

Wpływ komparatora na dokładność pomiaru zależy od czułości jego wejść pomiarowych i rzędu porównywanych napięć. Napięcia występujące w gałęziach mostka zależą od użytych rezystorów i prędkości przepływu. Zakładając najbardziej niekorzystny przypadek, tzn. prędkość przepływu równą 0 m/s, w tabeli 1 przedstawiono zakres zmian tego napięcia dla przykładowo dobranych wartości  $\overline{R_0}$  i  $R_c$ .

Tabela 1

Wyliczone parametry mostka i minimalne napięcie zasilania

Parametry mostka	Założone wartości $\overline{R_0} / R_c$ [ $\Omega/\Omega$ ]			
	10/100	20/200	50/500	100/1000
$R_a$ [ $\Omega$ ]	89,01	84,42	80,20	78,39
$R_b$ [ $\Omega$ ]	16,64	21,24	25,46	27,27
$U_{min}$ [V]	0,520	0,816	1,70	3,177

Przyjmując, że w układzie będą pracować komparatory o czułości rzędu kilkudziesięciu mikrowoltów, ich wpływ na dokładność pomiaru jest pomijalnie mały.

##### 4.2. Rozdzielczość użytego przetwornika

Wpływ rozdzielczości użytego przetwornika na dokładność pomiaru przedstawia tabela 2. Dokładność wzorcowania, w wyniku którego uzyskuje się stałe  $a$ ,  $b$ ,  $m$  - zależność (10), w przyjętym zakresie prędkości wynosi kilka procent (dla  $v$  do 1 m/s - 5%, dla  $v$  powyżej 1 m/s - 2%). Błąd wprowadzany przez przetwornik, wynikający z jego rozdzielczości, powinien być mniejszy od błędu wzorcowania ww. stałych. Ponieważ do obliczenia prędkości wymagana jest różnica napięć, w tabeli określono zależności  $(2\Delta_p / \Delta U) \times 100$ .

Obliczenia przeprowadzono dla napięcia odniesienia przetwornika  $U=10$  V. Wartości rezystorów wchodzących w skład mostka dla rezystancji anemometru „na zimno”  $R_0=5,87$   $\Omega$  są następujące:  $\overline{R_0}=50$   $\Omega$ ,  $R_c=500$   $\Omega$ ,  $R_a=80,2$   $\Omega$ ,  $R_b=80,2$   $\Omega$ . Przyjęty zakres zmian prędkości przepływu wynosi 0 - 12 m/s.

Tabela 2

Wpływ rozdzielczości przetwornika na dokładność pomiaru  $v$ 

Liczba bitów przetwornika	8 bitów		10 bitów		12 bitów		14 bitów		16 bitów	
Prędkość przepływu $v$ [m/s]	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12
$\Delta_p$ [mV]	39		9,77		2,44		0,61		0,15	
$U_1(R)$ [V] dla $n_1=1,3$	1,476	2,776	1,476	2,776	1,476	2,776	1,476	2,776	1,476	2,776
$U_2(R)$ [V] dla $n_2=1,8$	2,290	4,284	2,290	4,284	2,290	4,284	2,290	4,284	2,290	4,284
$(2\Delta_p/\Delta U) \times 100$	9,58	5,17	2,40	1,30	0,59	0,32	0,15	0,08	0,04	0,02

Z wyników przedstawionych w tabeli 2 wynika, że do układu pomiarowego należy wybrać przetwornik 12-bitowy.

#### 4.3. Algorytm obliczania prędkości $v$

Prędkość przepływu  $v$  wylicza się wzorem (10). Występujące w nim trzy stałe  $a$ ,  $b$  i  $m$  wyznacza się poprzez wzorcowanie przyrządu. W czasie wzorcowania dla ustalonego współczynnika nagrzania  $n_1$  lub  $n_2$  włókna zdejmuje się zależność  $I_G(v_k)$  dla znanych  $v_k$ . Następnie nanosząc wartości do wzoru Kinga (1) numerycznie wyznacza się wartości  $a$ ,  $b$  i  $m$ .

#### 5. PODSUMOWANIE

Zanalizowane zależności opisujące anemometr skompensowany temperaturowo z liniowo narastającym napięciem i liczbowe wyniki potwierdzają możliwość budowy układu, który docelowo może wykorzystywać do obliczeń układy mikroprocesorowe z bateryjnym zasilaniem.

Przyrząd miałby zastosowanie w pomiarach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, gdzie zmiany temperatury w czasie są powolne.

## LITERATURA

1. Kielbasa J., Ligęza P.: Temperature compensated single hot-wire anemometer. Proc. of TAGUNGS „Turbulente Ein- und Mehrphasestromungen", str. 85-91, 1991.
2. Kielbasa J., Ligęza P.: Mikroprocesorowy system termoanemometryczny. Materiały Konferencji Naukowej „Czujniki optyczne i elektroniczne - COE'92". Referaty i komunikaty, str. 355-362. Politechnika Warszawska, 1992.
3. Ligęza P.: Pomiary przepływów nieizotermicznych. Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Praca doktorska, 1993.
4. Kielbasa J.: Anemometryczne czujniki cieplne - fizyczne podstawy pracy. Materiały Konferencji Naukowej „Czujniki optyczne i elektroniczne - COE'92". Referaty i komunikaty, str. 363-368. Politechnika Warszawska, 1992.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Jakubiec, prof. Pol. Śl.

Wpłynęło do Redakcji dnia 24 października 1996 r.

**Abstract**

This paper describes a microprocessor system that controls a temperature compensated anemometer. This anemometer operates on a bridge while the supply voltage rises linearly. The electric current is determined indirectly i.e. by measurement of voltage on known resistor by means of A / D chart. The microprocessor system calculates the flow velocity basing on a current magnitude measured at time instants determined by comparators. The accuracy of calculated velocity depends on comparator sensitivity, resolution of A/D converter and the algorithm calculating final value of flow velocity. Required resolution of A/D converter is 12 or 14 bits. Error of comparators with input sensitivity of the order of tens  $\mu\text{V}$  can be negligible.