ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1972

Seria: ELEKTRYKA z. 33 Nr kol. 322

Otylia Brandys, Józef Parchański
Katedra Technologii
i Metrologii Elektrycznej

ZASTOSOWANIE PRZEPŁYWOMIERZY KALORYMETRYCZNYCH

Streszczenie. W artykule dokonano przeglądu konstrukcji czujników i podano parametry wykonanych przepływomierzy kalorymetrycznych działających na zasadzie walca Thomasa oraz nagrzewania warstwy granicznej.

Wstęp

Wśród metod pomiaru natężenia i prędkości przepływu gazów i cieczy coraz szersze zastosowanie znajduje metoda kalorymetryczna. Zaletami tej metody są:

- możliwość pomiaru natężenia oraz prędkości praktycznie wszystkich gazów i cieczy, w tym również gazów znajdujących się pod zwiększonym ciśnieniem oraz cieczy chemicznie aktywnych,
- mała stała czasowa,
- pomiary przepływów pulsujących,
- możliwość przesyłu sygnału na odległość.

Wadą tej metody jest zależność charakterystyk czujnika od własności fizycznych medium. Stąd wynika konieczność oddzielnego wzorcowania miernika dla każdego rodzaju medium.

Ogólna zasada działania

W przepływomierzach kalorymetrycznych wykorzystuje się wpływ ruchu medium (cieczy lub gazu) na zjawisko przenoszenia ciepła. Jeżeli do układu (rys. 1a) doprowadza się ciepło z niezależnego źródła (grzejnik elektryczny), wówczas dla prędkości przepływu równej zeru rozkład temperatury wzdłuż osi rury jest symetryczny względem osi grzejnika. Jeżeli medium przepływa z prędkością v, symetria rozkładu temperatury zostaje zachwiana (rys. 1b). Powstaje różnica temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$, gdzie T_1, T_2 – temperatury medium przed i za grzejnikiem.

Punktem wyjścia do rozważań teoretycznych jest równanie bilansu cieplnego:

$$\dot{Q}_g - \dot{Q}_o = \dot{Q} \qquad (1)$$

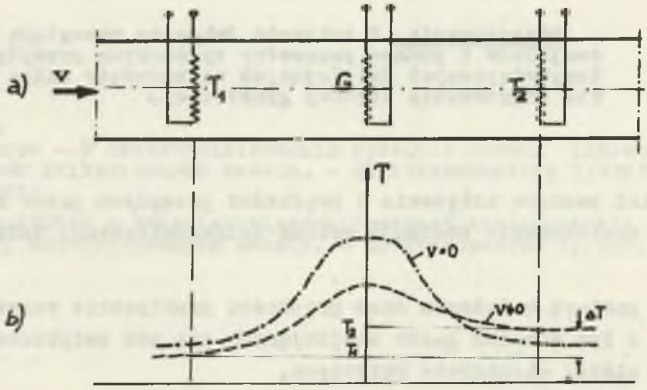
gdzie:

$\dot{Q}_g$ – ciepło dostarczone do układu w jednostce czasu, równe mocy P_g grzejnika

$$\dot{Q}_g = P_g \tag{2}$$

$\dot{Q}_o$ – straty ciepła do otoczenia,

$\dot{Q}$ – ciepło zużyte na powstanie różnicy temperatur ΔT.



Rys. 1

a – Schemat przepływomierza kalorymetrycznego (G – grzejnik, T_1, T_2 – termometry oporowe), b – Rozkład temperatury wzdłuż osi rury

Najczęściej konstrukcja przepływomierza zapewnia minimalne straty ciepła do otoczenia, więc:

$$\dot{Q}_o \ll \dot{Q}_g \tag{3}$$

Ciepło $\dot{Q}$ zużyte na powstanie różnicy temperatur ΔT jest proporcjonalne do tej różnicy:

$$\dot{Q} = K \cdot \Delta T \tag{4}$$

gdzie:

K – współczynnik proporcjonalności zależny od następujących czynników:
- własności fizycznych medium,
- natężenia przepływu,
- konstrukcji przepływomierza, a ściślej od sposobu przenoszenia ciepła (wnikanie, przewodzenie).

Konstrukcje przepływomierzy kalorymetrycznych

Ze względu na różnicę w sposobie przenoszenia ciepła spotyka się dwa zasadnicze typy przepływomierzy kalorymetrycznych:

- działające na zasadzie nagrzewania całej masy przepływającego medium (walec Thomasa),
- działające na zasadzie przenoszenia ciepła przez warstwę graniczną medium.

Uproszczone schematy konstrukcyjne wraz z krótkimi opisami przedstawia tablica 1.

Określenie współczynnika K

Dla przepływomierzy, w których nagrzewana jest cała masa przepływającego medium, ciepło $\dot{Q}$ zużyte na podstawie różnicy temperatur wynosi:

$$\dot{Q} = C_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \qquad (5)$$

gdzie:

C_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu;

$\dot{m}$ – masowe natężenie przepływu;

ΔT – różnica temperatur;

Stąd:

$$K_1 = C_p \cdot \dot{m} \qquad (6)$$

Dla przepływomierzy działających na zasadzie nagrzewania warstwy granicznej medium określenie współczynnika K jest bardzo skomplikowane. Dlatego też korzysta się z uproszczonych zależności. Ciepło $\dot{Q}$ przy założeniu, że współczynnik przewodności cieplnej warstwy granicznej medium jest pomijalnie mały w stosunku do współczynnika przewodności cieplnej ścianki rury, wynosi:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \qquad (7)$$

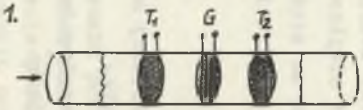
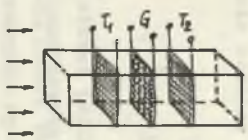
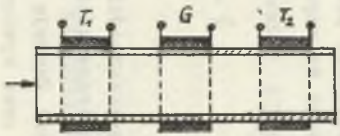
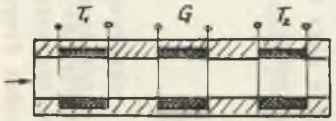
gdzie:

α – współczynnik przewodności cieplnej warstwy granicznej medium;

A – powierzchnia biorąca udział w przewodzeniu ciepła;

Współczynnik α jest funkcją masowego natężenia przepływu medium, jego własności fizycznych oraz wymiarów geometrycznych czujnika.

Tablica 1

Uproszczony schemat konstrukcyjny G - grzejnik, T_1 T_2 - termometry oporowe	U w a g i
1. 	Powierzchnie przekroju rurociągu i czujnika są jednakowe. Zastosowanie: pomiary masowego natężenia gazów oraz cieczy nieprzewodzących. Maksymalny zakres pomiarowy zależy od wytrzymałości mechanicznej grzejnika oraz termometrów oporowych
2. 	Konstrukcja czujnika podobna do poprzedniej. Zastosowanie: pomiary natężenia przepływu gazów oraz cieczy nieprzewodzących w rurociągach o bardzo dużych średnicach.
3. 	Grzejnik oraz termometry oporowe nawinięte na cienkościennej rurze wykonanej z materiału o dobrej przewodności cieplnej. Zastosowanie: pomiary natężenia przepływu gazów, cieczy, przede wszystkim cieczy chemicznie aktywnych.
4 	Odmiana poprzedniej konstrukcji. Grzejnik oraz termometry oporowe bezpośrednio stykają się z cieczą Materiał rury - dobry izolator cieplny. Zastosowanie: gazy oraz ciecze nieprzewodzące.

Dla przepływu turbulentnego [1]

$$= 0{,}023 \frac{\lambda^{0{,}6} \cdot c_p^{0{,}4}}{D^{1{,}8} \cdot \mu^{0{,}4}} \cdot \dot{m} = C_1 \cdot \dot{m}, \tag{8}$$

gdzie:

λ – współczynnik przewodności cieplnej medium; W/(m.deg)
C_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, J/(g.deg)
D – średnica wewnętrzna rury, m
μ – współczynnik lepkości dynamicznej medium, g/(m.s)

Z zależności (7) i (8) otrzymuje się:

$$\dot{Q} = C_1 \cdot A \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \tag{9}$$

Stąd:

$$K_2 = C_1 \cdot A \cdot \dot{m} \tag{10}$$

Podstawowe równanie przepływomierzy kalorymetrycznych można zatem sprowadzić do postaci:

$$P_g = C \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \tag{11}$$

lub

$$P_g = C \cdot S \cdot \varrho \cdot v \cdot \Delta T = C' \cdot v \cdot \Delta T \tag{12}$$

gdzie:

$$C' = C \cdot S \cdot \varrho,$$

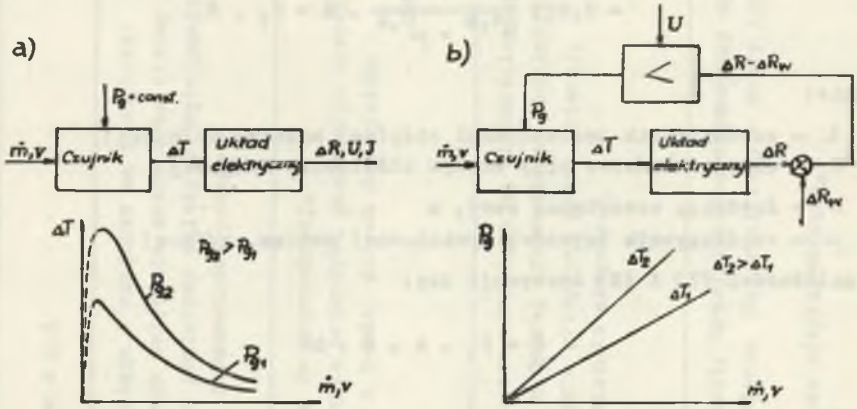
S – powierzchnia przekroju wewnętrznego rury,
ϱ – gęstość medium,
v – prędkość przepływu.

Układy pomiarowe

Z równania (11) wynikają bezpośrednio dwie metody pomiarowe:

– przy stałej mocy grzejnika: $\dot{m} = f(\Delta T)_{P_g = const.}$
– przy stałej różnicy temperatur: $\dot{m} = f(P_g)_{\Delta T = const.}$

Schematy blokowe oraz charakterystyki statyczne układów przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schematy blokowe oraz charakterystyki statyczne układów pomiarowych przepływomierzy

a - przy stałej mocy grzejnika, b - przy stałej różnicy temperatur

Wyniki doświadczeń

W Katedrze Technologii i Metrologii Elektrycznej wykonano prototypy kilku czujników o różnych konstrukcjach. Przeprowadzone badania w pełni potwierdzają prawdziwość teoretycznych zależności. Ponadto wyciągnięte zostały wnioski do dalszej konstrukcji tego typu czujników oraz metod pomiaru.

W przypadku małego zakresu pomiarowego korzystniej jest stosować metodę stałej mocy grzejnika.

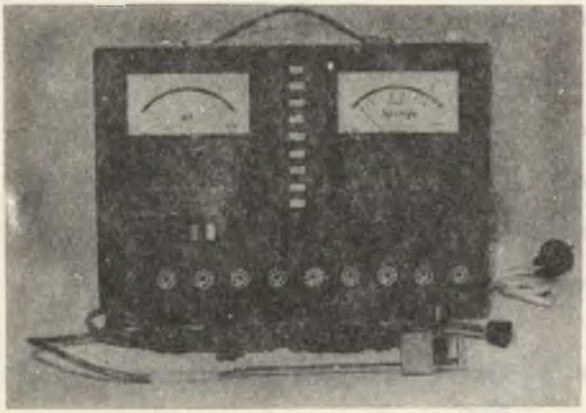
Jeżeli zachodzi potrzeba pomiaru natężenia przepływu w szerokim zakresie, korzystniej jest stosować układ o stałej różnicy temperatur.

Do pomiaru temperatury najczęściej stosuje się termometry oporowe włączone w sąsiednie gałęzie mostka Wheatstone'a. Dzięki temu uzyskuje się kompensację wpływu temperatury medium. Można również stosować termoelementy lub termometry termistorowe.

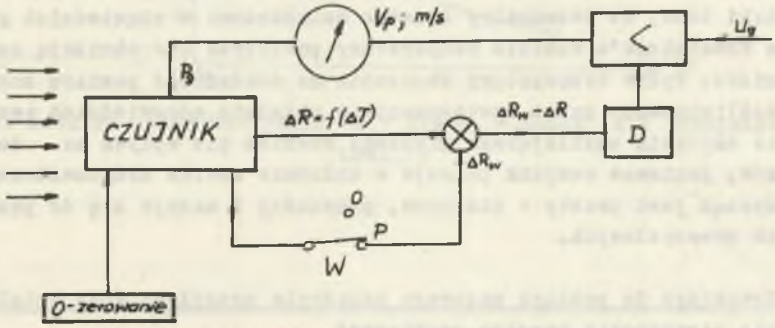
Przyrząd do pomiaru prędkości powietrza w kanałach wentylacyjnych maszyn elektrycznych (typ MVp - 1/70) rys. 3

Czujnik wykonano w postaci miniaturowego walca Thomasa (8x20x30 mm). Rezystancje grzejnika oraz termometrów oporowych wynoszą 22Ω . Aby równocześnie można mierzyć prędkość powietrza w różnych punktach maszyny, przyrząd wyposażono w 9 identycznych czujników.

Ze względu na szeroki zakres mierzonych prędkości (0 ... 30 m/s) zastosowano układ pomiarowy przy stałej różnicy temperatur.



Rys. 3. Widok płyty czołowej oraz czujnik przyrządu MV_p - 1/70



Rys. 4. Schemat blokowy przyrządu MV_p - 1/70

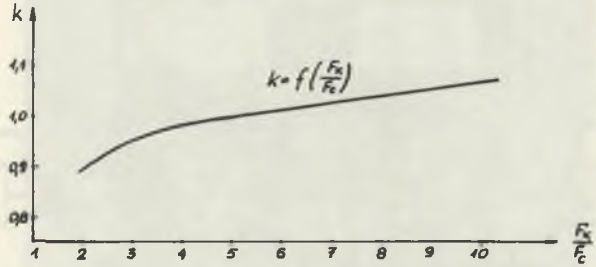
Schemat blokowy przyrządu przedstawiono na rys. 4. Moc grzejnika jest proporcjonalna do prędkości powietrza przepływającego przez czujnik. Jeżeli wymiary kanału i czujnika będą jednakowe, to prędkości powietrza w kanale i w czujniku też będą jednakowe. Jeżeli jednak przekrój kanału jest większy niż przekrój czujnika, to ze względu na opór aerodynamiczny czujnika prędkość powietrza w czujniku będzie mniejsza niż prędkość w kanale. Prędkość powietrza w kanale określona jest zależnością:

$$v = k \cdot v_p \tag{13}$$

gdzie:

- v - prędkość powietrza w kanale,
- v_p - prędkość powietrza w czujniku,
- k - współczynnik zależny od stosunku przekroju kanału F_k do przekroju czujnika F_o.

Wartości współczynnika k wyznaczone eksperymentalnie dla wykonanych czujników podano na rys. 5.



Rys. 5. Wykres wartości współczynnika $k = f(\frac{F_k}{F_0})$

Przyrząd wywzorcowano wprost w jednostkach prędkości (m/s) dla $F_k/F_0 = 5$. Dzięki temu, że termometry oporowe umieszczono w sąsiednich gałęziach mostka Wheatstone'a wahania temperatury powietrza nie obniżają dokładności pomiaru. Wpływ temperatury otoczenia na dokładność pomiaru mocy grzejnika wyeliminowano przez zastosowanie w układzie odpowiednich termistorów. Wahanie napięcia zasilającego przyrząd również nie wpływa na dokładność pomiarów, ponieważ czujnik pracuje w układzie mostka zrównoważonego.

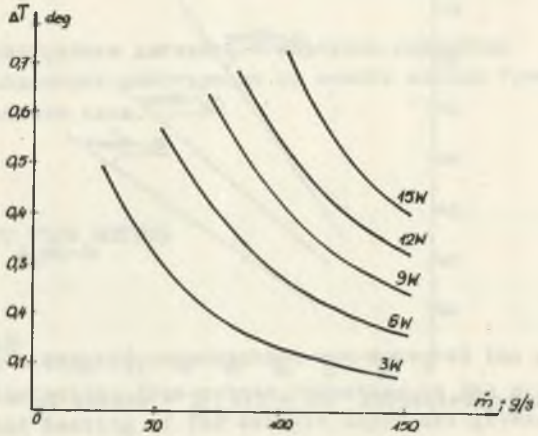
Przyrząd jest prosty w obsłudze, przenośny i nadaje się do pracy w warunkach przemysłowych.

Przepływomierz do pomiaru masowego natężenia przepływu wody działający na zasadzie nagrzewania warstwy granicznej

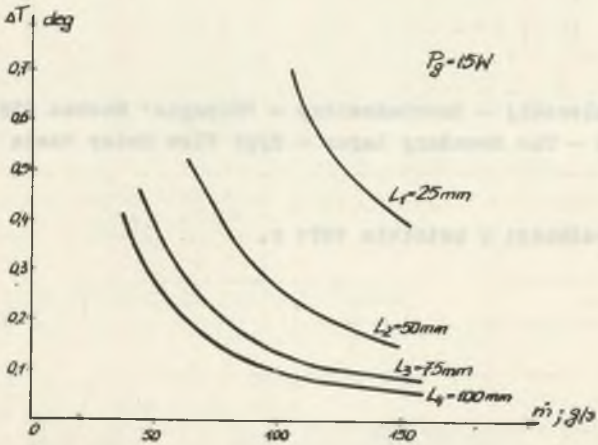
Wykonano kilka prototypów czujników z rury aluminiowej o konstrukcji przedstawionej w tablicy 1 rys. 3. Dane konstrukcyjne czujników przedstawiono w tablicy 2, a wyniki pomiarów na rysunkach 6, 7, 8.

Tablica 2

Lp.	Średnica wewnętrzna D_w	Rezystancja termometru oporowego	Odległość termometru oporowego od grzejnika L	Parametry stałe
	mm	Ω	mm	
1	8	61	33	Długość rury 280 mm Grubość ścianki 0,5 mm Rezystancja grzejnika $R_g = 5\Omega$
2	14	80	25,50,75,100	
3	22	80,100,127	30	
4	28	82	27	



Rys. 6. Rodzina charakterystyk $T = f(\dot{m})P_g = const$ dla czujnika nr 2 tabl. 2

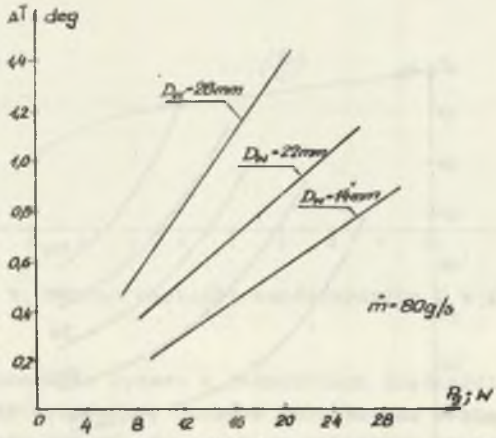


Rys. 7. Wpływ odległości termometrów oporowych od grzejnika na charakterystyki czujnika nr 2 tabl. 2

$\Delta T = f(\dot{m})P_g = const \quad L = L_1, \; L_2, \; L_3, \; L_4$

Pomiary wykonano w układzie mostka Wheatstone'a (metoda zerowa).

Celem przeprowadzonych pomiarów było zbadanie wpływu niektórych parametrów na czułość układu.



Rys. 8. Charakterystyki $\Delta T = f(P_g)_{\dot{m}}$ = const; $D_w = D_{w2}, D_{w3}, D_{w4}$

Zwiększenie czułości można uzyskać:

- zwiększając moc grzejnika P_g (rys. 6),
- zmniejszając odległość termometrów oporowych od grzejnika (rys. 7),
- zwiększając średnicę rury czujnika (rys. 8)
  (wówczas zwiększa się powierzchnia warstwy granicznej biorąca udział w przenoszeniu ciepła).

Literatura

[1] P.P. Kremlewskij - Raschodomiery - "Maszgiz" Moskwa 1964 r.
[2] J.H. Laub - The Boundary Layer - Type Flow Meter "Acta Imeko" I 1964r.

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1971 r.

ПРИМЕНЕНИЕ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ

Р е з ю м е

Проведено осмотр конструкции датчиков и переданы параметры сделанных калориметрических расходомеров действующих на основе валика Тгомаса а также нагревания по граничного слоя.

THE USE OF CALORIMETRIC FLOW METERS

S u m m a r y

A survey of sensing elements' construction was done and the parameters of the constructed calorimetric flow-meters operating on the principle of the Thomas' cylinder and heating of the outward layer are given.