

Tadeusz FILAR

Instytut Metalurgii
Akademia Górniczo-Hutnicza

CZUJNIK TERMOELEKTRYCZNY DLA DOKŁADNYCH POMIARÓW TEMPERATURY GAZÓW

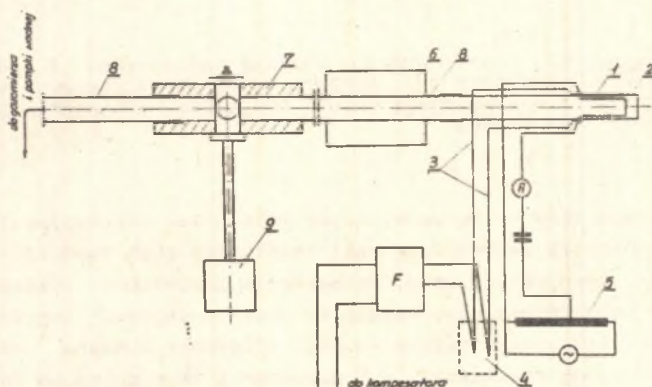
Streszczenie. Przeprowadzono analizę teoretyczną i badanie czujników termoelektrycznych do pomiaru temperatury gazów. Stwierdzono, że czujniki te nie wymagają dużych prędkości, odciągania gazu, a ich dokładność jest wysoka.

Wiele procesów cieplnych, spotykanych w technice przemysłowej, jak również szereg stanowisk laboratoryjnych, umożliwiających badania poznawcze, wymaga pomiarów temperatury gazu. Osiągnięcie odpowiednio wysokich dokładności pomiaru temperatury gazu należy do najtrudniejszych zagadnień w metrologii. Znane i zabezpieczające wysoką dokładność pomiaru metody są trudne w praktycznej realizacji, zaś porównanie tych metod, co do ich klasy dokładności, jest niemożliwe z uwagi na brak możliwości określenia błędu obarczającego wyniki pomiaru. Brak zaś wzorca temperatury gazu powoduje, że nie można ich sprawdzać ani cechować.

Należy nadmienić, że metrologia dyskwalifikuje wyniki pomiarów w przypadkach, gdy nie można podać ich dokładności. Każdy czujnik umieszczony w ośrodku gazowym w celu zmierzenia jego temperatury ma kontakt cieplny ze ścianami ośrodka poprzez promieniowanie oraz z otoczeniem poprzez przewodzenie ciepła wzdłuż czujnika. Decyduje to o powstaniu systematycznego błędu pomiaru, którego wartość w warunkach stacjonarnych jest zależna od ilości ciepła wymienianego pomiędzy czujnikiem a ścianami ośrodka i otoczeniem oraz od współczynnika wymiany ciepła pomiędzy czujnikiem a gazem. Wyznaczenie tego błędu, z uwagi na skomplikowany charakter wymiany ciepła, jest bardzo trudne. Powszechnie znane układy do pomiaru temperatury gazu posiadają taką konstrukcję, że ograniczają wpływ ścianki i otoczenia na czujnik lub zwiększają wymianę ciepła pomiędzy gazem a czujnikiem, w wyniku czego rośnie dokładność pomiaru - ale tylko jakościowo. Przykładem tego jest różnica poglądów różnych autorów co do wymaganej prędkości odciągania gazu w czujnikach aspiracyjnych (od 150 m/s (1) do wartości 1,2 Ma (2)). Osiągnięcie takich prędkości jest ponadto trudne nie tylko w warunkach przemysłowych ale i laboratoryjnych. Ograniczone możliwości stosowania mają również aspiracyjne czujniki dopływowe (3), gdyż zakres pomia-

rowy zależy od wytrzymałości termicznej rozmieszczonego wokół spoiny termoelementu uzwojenia grzejnego, zaś pomiar z uwagi na konieczność wykonywania w trakcie eksperymentu wykresów jest pomiarem złożonym i czasochłonnym, uniemożliwiającym pomiary temperatur zmieniających się w czasie.

Wymienione problemy zostały wyeliminowane w nowej konstrukcji czujnika dogrzanego prądem zmiennym, bezpośrednio płynącym przez spoinę termoelementu. Analiza pracy czujnika umożliwia wyznaczenie systematycznego i przypadkowego błędu pomiaru temperatury gazu. Rurka aspiracyjna może być chłodzona wodą, a zatem zakres pomiarowy zależy tylko od wytrzymałości termicznej termoelektrod. Schemat układu pomiarowego przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Czujnik temperatury z kompensacją strat ciepła. Schemat aparatury 1 - rurka aspiracyjna, 2 - spoina termoelementu, 3 - termoelektrody, 4 - termostat, 5 - autotransformator, 6 - chłodnica wodna, 7 - wirująca przepustnica, 8 - rurka miedziana, 9 - silnik z regulacją obrotów, F - filtr dolnoprzepustowy

Wirująca przepustnica zapewnia okresową zmianę prędkości odciągania gazu przez rurkę aspiracyjną. W wyniku tego temperatura spoiny termoelementu zmienia się okresowo, a amplituda zmian zależy od różnicy między temperaturą spoiny i temperaturą gazu oraz od pulsacji odciągania. Siła termoelektryczna jest mierzona kompensatorem lub miliwoltomierzem magnetoelektrycznym, przy czym wskazówka galvanometru lub miliwoltomierza oscyluje z pulsacją równą pulsacji odciągania gazu. Dogrzanie spoiny prądem w takim stopniu, przy którym pulsacja miernika jest minimalna, świadczy o wyrównaniu się temperatury gazu i spoiny termoelementu. Miernik połączony jest z termoelementem poprzez filtr dolnoprzepustowy, ograniczający składową zmienność prądu w takim stopniu, aby nie dopuścić do zniszczenia miernika. Kondensator w obwodzie dogrzewania zapobiega zwarceniu siły termoelektrycznej.

Zestawienie bilansu cieplnego dla termoelementu i rurki aspiracyjnej, przy założeniu stałego gradientu temperatury wzdłuż czujnika i dużej różnicy między temperaturą ośrodka a temperaturą otoczenia, prowadzi do układu równań różniczkowych.

$$\frac{dT_a}{d\tau} = \frac{\alpha_a}{f \vartheta_a C_a} S (T_g - T_a) - \frac{\epsilon_a G S}{f \vartheta_a C_a} (T_a^4 - T_o^4) - \frac{\lambda_a}{\vartheta_a C_a} l^{-2} T_a$$

$$\frac{dT_c}{d\tau} = \frac{\alpha_c}{r \vartheta_c C_c} (T_g - T_c) - \frac{I^2 R}{\vartheta_c C_c} \pi^{-2} - \frac{\epsilon_c G}{r \vartheta_c C_c} (T_c^4 - T_a^4) - \frac{\lambda_c}{\vartheta_c C_c} l^{-2} T_c, \quad (1)$$

gdzie:

- T - temperatura,
- S - obwód wewnętrzny rurki aspiracyjnej,
- f - powierzchnia przekroju ściany rurki aspiracyjnej,
- r - promień przekroju termoelektrod,
- ϑ - gęstość,
- C - ciepło właściwe,
- λ - współczynnik przewodzenia ciepła,
- G - stała Boltzmanna,
- ϵ - współczynnik emisji,
- l - głębokość zanurzenia czujnika,
- τ - czas,
- I - natężenie zmiennego prądu dogrzewającego,
- R - rezystywność,
- α - współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła.

Indeksy dotyczą:

- a - rurki aspiracyjnej,
- c - termoelektrod,
- g - gazu,
- o - ścian osrodka.

Wielkością wymuszającą zmiany temperatury spoiny termoelementu T_c jest zmiana współczynników konwekcyjnej wymiany ciepła $\Delta\alpha_c$ i $\Delta\alpha_a$. Dla dowolnych warunków, efektywnego rozwiązania układu równań (1) nie udaje się podać. Jednak dla stałej temperatury gazu i okresowej zmiany współczynników konwekcyjnej wymiany ciepła wystarcza rozpatrzyć sinusoidalne warunki ustalone tego układu. W tym przypadku zmiany temperatury spoiny i rurki aspiracyjnej są małe, więc przy stałej mocy dogrzewania układ równań (1) można linearyzować. Celowe jest przeprowadzenie linearyzacji wokół punktu odpowiadającego warunkom ustalonym, dla którego przy stałej wartości T_g , temperatura spoiny osiągnie wartość T_{co} a rurki aspiracyjnej T_{ao} .

Zatem

$$\alpha_a = \alpha_{a0} + \Delta \alpha_a$$

$$\alpha_c = \alpha_{c0} = \Delta \alpha_c$$

$$T_c = T_{c0} + \Delta T_c$$

$$T_a = T_{a0} + \Delta T_a,$$

co przy założeniu liniowego związku pomiędzy $\Delta \alpha_c$ i $\Delta \alpha_a$

$$\Delta \alpha_a = \Delta \alpha_c \cdot k$$

oraz przejściu na układ równań bezwymiarowych, otrzymujemy:

$$\frac{d}{dFo} \Delta T_a + \frac{a}{a_c} \left(\frac{r}{h}\right)^2 [Bi_{ka} + Bi_{ra} + \left(\frac{h}{T}\right)^2] \Delta T_a = \frac{1}{2} k \frac{\lambda_b}{\lambda_a} \frac{r}{h} \frac{a}{a_c} (T_g - T_{a0}) \Delta Nu$$

$$\frac{d}{dFo} \Delta T_c + 2[Bi_{kc} + Bi_{rc} + \left(\frac{r}{T}\right)^2] \Delta T_c - 2Bi_{ra} \frac{r}{h} \frac{\lambda_a}{\lambda_c} \Delta T_a = \frac{\lambda_b}{\lambda_c} (T_g - T_{c0}) \Delta Nu,$$

gdzie:

Fo, Bi, Nu - liczby podobieństwa

$$Fo = \frac{a_c T}{r^2}; \quad Nu = \frac{\alpha_c d}{\lambda_b}; \quad a = \frac{\lambda}{c\theta}; \quad d = 2r$$

h - grubość ścianki rurki aspiracyjnej.

Indeksy dotyczą:

r - radiacji,

k - konwekcji.

Zatem otrzymujemy układ równań:

$$\frac{d}{dFo} \Delta T_a + A \Delta T_a = C_1 \Delta Nu$$

$$\frac{d}{dFo} \Delta T_c + B_1 \Delta T_c - B_2 \Delta T_a = C_2 \Delta Nu.$$

Stosując dla warunków początkowych zerowych transformację Laplace'a, wyznaczamy transmitancję czujnika

$$K(s) = \frac{\Delta T_c(s)}{\Delta Nu(s)} = \frac{C_2 s + (C_2 A + C_1 B_2)}{(s + B_1)(s + B_2)}, \quad (2)$$

gdzie:

$$A = \frac{a}{a_c} \left(\frac{r}{h}\right)^2 \left[Bi_{ka} + Bi_{ra} + \left(\frac{h}{l}\right)^2 \right]; \quad B_1 = \frac{\alpha_r}{\lambda_c}$$

$$B_1 + 2 \left[Bi_{kc} + Bi_{rc} + \left(\frac{r}{l}\right)^2 \right]; \quad B_2 = 2 Bi_{ra} \frac{r}{h} \frac{\lambda_b}{\lambda_c}$$

$$C_1 = \frac{1}{2} k \frac{\lambda_b}{\lambda_c} \frac{r}{h} \frac{a}{a_c} (T_g - T_{ao}); \quad C_2 = \frac{\lambda_b}{\lambda_c} (T_g - T_{co}).$$

Ponieważ $B_1 > 0$ i $B_2 > 0$, więc pierwiastki mianownika są rzeczywiste i ujemne. Czujnik spełnia więc warunki członu inercyjnego. Zgodnie z zaproponowanym sposobem pomiaru ΔNu jest funkcją okresową:

$$\Delta Nu = |\Delta Nu| e^{i\omega t},$$

gdzie:

$$\omega - \text{pulsacja odciąganego gazu, } i = \sqrt{-1}.$$

Przechodząc na zmienną niezależną Fo

$$\Delta Nu_{(Fo)} = |\Delta Nu| e^{i\Phi Fo}, \quad \Phi = \omega \frac{r^2}{a_c}.$$

Moduł transmitancji czujnika otrzymujemy podstawiając do (2) liczbę urojoną, $s = i\Phi$

$$K(i\Phi) = \frac{|\Delta T_c|}{|\Delta Nu|} = \frac{\left[(C_2 A + C_1 B_2)^2 + C_2^2 \Phi^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[(B_1^2 + \Phi^2)(A^2 + \Phi^2) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (3)$$

Zasada pomiaru czujnikiem polega na dobraniu takiej mocy dogrzewania, aby sprowadzić amplitudę zmian temperatury termoelementu do minimum. Różnica pomiędzy temperaturami gazu i termoelementu ma decydujący wpływ na współczynnik C_2 . Pozostałe współczynniki są praktycznie stałe i funkcja osiągnie minimum, gdy:

$$C_2 = - \frac{AB_2 C_1}{A^2 + \Phi^2},$$

a więc nie przy $C_2 = 0$, wówczas temperatura gazu byłaby równa temperaturze termoelementu. Tak więc pomiar obarczony jest błędem systematycznym, możliwym do obliczenia na podstawie zależności:

$$T_{co} - T_g = C_2 \frac{\lambda_c}{\lambda_g}. \quad (4)$$

W celu ograniczenia błędu systematycznego konstrukcja czujników winna zapewnić jak najmniejsze wartości współczynników B_2 i C_1 , co ściśle wiąże się ze stosowaniem małych średnic termoelektrod. Czujnik współpracuje z miernikiem, którego własności dynamiczne można aproksymować członem inercyjnym I rzędu o transmitancji

$$K_m(s) = \frac{\Delta W(s)}{\Delta T_c(x)} = \frac{G}{T_{s+1}} e^{-s\tau_0},$$

gdzie:

- G - czułość miernika,
- T - stała czasowa,
- τ_0 - czas opóźnienia,
- W - kąt odchylenia miernika.

Moduł transmitancji miernika dla okresowej funkcji:

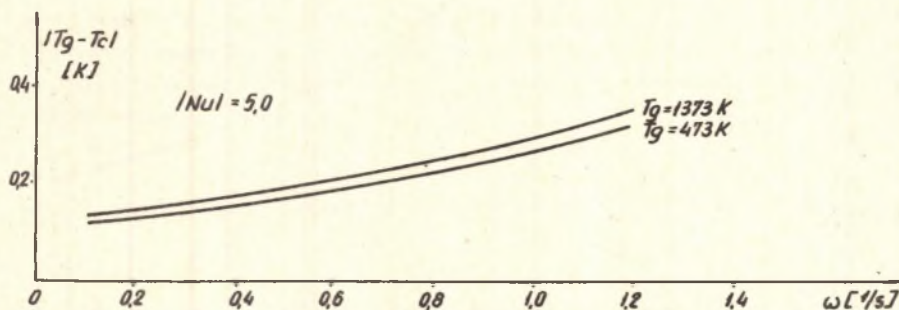
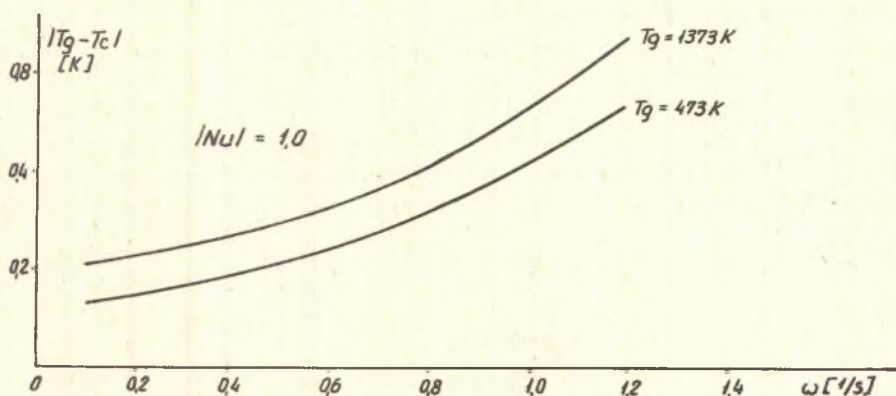
$$|K_m(i\omega)| = \frac{|\Delta W|}{|\Delta T_c|} = G(1 + T^2\omega^2)^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Moduł transmitancji układu pomiarowego jest iloczynem zależności (3) i (5), co po opuszczeniu $C_1 B_2$ prowadzi do związku:

$$|T_g - T_{co}| < \frac{|\Delta W|}{|\Delta Nu|} \frac{\lambda_c}{\lambda_g} \left[\frac{(1 + T^2\omega^2)(B_1^2 + \Phi^2)}{G^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

określającego błąd przypadkowy pomiaru.

W celu sprawdzenia powiązanego modelu matematycznego wykonano czujnik, w oparciu o termoelement NiCr-Ni, o średnicy 0,2 mm. Jako miernika użyto kompensatora klasy 0,05 z galvanometrem, którego $G = 2,3$ działek/K oraz stałej czasowej $T = 2s$. Czujnikiem tym mierzono temperaturę ogrzanego po-



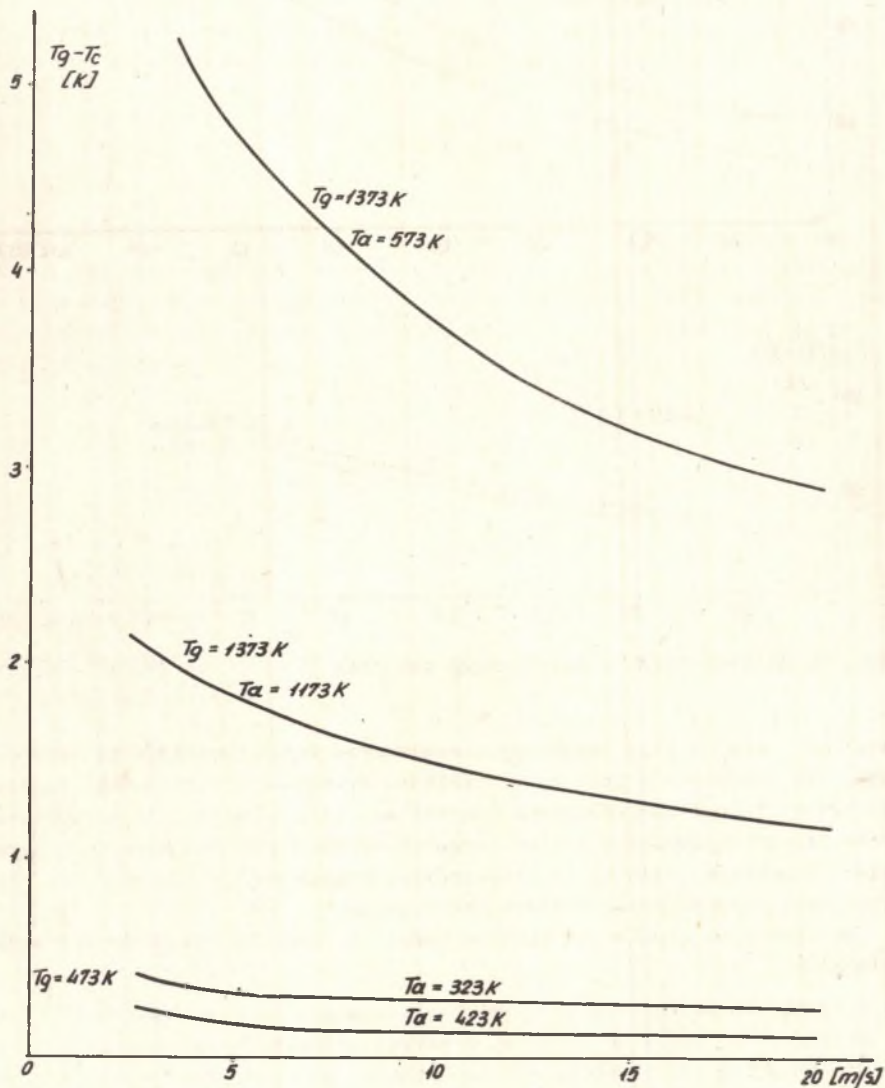
Rys. 2. Wartość błędów przypadkowych czujnika $T_g - T_s = f(\omega; |Nu|; T_g)$

wietrza i spalin przy zmiennej temperaturze ścian rurociągu prowadzącego gaz, zaś temperatura gazu była stabilna. Wskazania czujnika nie zależały od temperatury ścian. Podobnym czujnikiem, lecz w oparciu o termoelement PtRh-Pt, przeprowadzono pomiar temperatury spalin opuszczających komorę pieca węglowego. Badania te potwierdziły przydatność eksploatacyjną tego typu czujników do pomiaru temperatury gazów.

Na podstawie uzyskanych wyników badań i analizy teoretycznej należy stwierdzić, że:

- czujnik nie wymaga dużych prędkości odciągania gazu i dokładność jego nieznacznie rośnie ze wzrostem średniej prędkości gazu powyżej 10 m/s,
- dokładność pomiaru zależy od bezwładności miernika, lecz w przypadku stosowania kompensatorów z galvanometrem o stałej czasowej około 2 s błąd przypadkowy jest mały w stosunku do błędów systematycznych (rys. 2 i 3),
- błąd systematyczny jest spowodowany tym, że minimum zmian wskazań miernika występuje przy temperaturze spalin nieznacznie wyższej od temperatury gazu,

- rurka aspiracyjna może być chłodzona, gdyż jej temperatura praktycznie nie wpływa na błąd pomiaru.



Rys. 3. Błąd systematyczny pomiaru temperatury gazu czujnikiem dogrzewanym w zależności od średniej prędkości odciągania

LITERATURA

- [1] Wojciechowski J.: Pomiary w elektrowniach ciepłych. PWNT, Warszawa 1958.
- [2] Matton G., Foure C.: Termopary dla izmierienia wysokich temperatur w gazowych potokach. Materiały VI i VII międzynarodowych symposiumow po gorienju. Moskwa 1963.
- [3] Dawidowski R.: Technologia ciepła i paliwa. Kraków 1932.
- [4] Gordow A.N.: Izmierienie temperatur gazowych potokow. Moskwa-Lenin-grad 1964.
- [5] Filar T.: Sposób pomiaru temperatury gazu termoelementem dogrzewanym i układ do stosowania tego sposobu. Pat. PRL Nr 65127.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ

Р е з ю м е

В статье рассматривается теоретический анализ и исследование термоэлектрических датчиков для измерения температуры газов. Установлено, что эти датчики не требуют больших скоростей, оттягивания газов, а их точность является высокой.

THE THERMOELECTRIC INDICATOR FOR PRECISE GAS TEMPERATURE MEASUREMENTS

S u m m a r y

The theoretical analysis and the practical examination of thermoelectric indicators for gas temperature measurement have been performed. It has been stated that these indicators do not require high speeds, gas draw-off, and that their precision is high.