

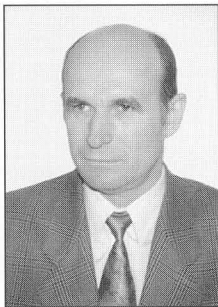
## Stanisław ŁĘTOWSKI<sup>1</sup>, Paweł SŁOMIŃSKI<sup>2</sup>, Wojciech SŁOMIŃSKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>POMORSKA SPÓŁKA GAZOWNICTWA SP. Z O.O., <sup>2</sup>POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW ELEKTORNICZNYCH

# Pomiary strumienia gazu ziemnego przepływomierzem termooanemometrycznym, część I - analiza teoretyczna

dr Stanisław ŁĘTOWSKI

ukończył fizykę na Uniwersytecie Jagiellońskim. Następnie wieloletni pracownik Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Gdańskiego gdzie m.in. obronił pracę doktorską. W 1997 roku rozpoczął pracę w Pomorskim Okręgowym Zakładzie Gazowniczym w Gdańsku organizując komórke zajmującą się nowymi technikami gazowniczymi, a następnie w 2003 roku organizował pion handlowy w Pomorskiej Spółce Gazownictwa Sp. z o.o. Obecnie pełni funkcję dyrektora Biura Handlowego w tej Spółce. Jest autorem i współautorem ponad 50 publikacji z zakresu fizyki i gazownictwa oraz 20 patentów.



e-mail: stanislaw.letowski@psgaz.pl

### Streszczenie

W dwuczęściowej publikacji opisuje się opracowanie przenośnego kontrolnego układu pomiarowego do sprawdzania gazomierzy w stacjach sieci dystrybucyjnej gazu ziemnego. W pierwszej części omówiono wybraną do realizacji termooanemometryczną metodę pomiarową, podano uogólniony model opisujący działanie przepływomierza wg tej metody, opisano parametry jednego z rozwiązań technicznych takiego przepływomierza oraz zidentyfikowano i zanalizowano źródła błędów pomiarowych.

### Abstract

The development of a portable control meter working in stations in natural gas distributing network was presented in this two-part publication. In the first part of the article there are presented: the thermoanemometrical method of measurement, the generalised model describing the work of a stream meter based on this method, parameters of the example of such a stream meter, and both the identification and analysis of error sources.

## 1. Wstęp

Gaz ziemny należy do grupy tych mediów, które wskutek swoich parametrów fizyko chemicznych stawiają duże wymagania konstruktorom urządzeń pomiarowych. Zarówno istniejące metody pomiaru jak i ich techniczne realizacje różnią się właściwościami metrologicznymi. Układy pomiarowe przepływu gazu ziemnego służą przede wszystkim do rozliczeń w przedsiębiorstwach zajmujących się jego wydobyciem, przesyłem i dystrybucją. Poprawność pomiaru istotnie wpływa na gospodarkę finansową tych przedsiębiorstw. Pomorska Spółka Gazownictwa Sp. z o.o. ciągle ulepsza stosowane systemy rozliczeń gazu. Cele omawianego projektu innowacyjnego było opracowywanie przenośnego kontrolnego układu pomiarowego dla stacji sieci dystrybucyjnej, charakteryzującego się dużą dokładnością pomiaru i możliwością łatwego przemieszczania z jednego ciągu pomiarowego na inny. Po szeregowym dołączeniu z układem roboczym ma on umożliwiać ocenę poprawności wskazań badanego gazomierza. Pierwszy etap pracy zawierał analizę teoretyczną problemu, w tym wybór odpowiedniej metody pomiarowej i rozwiązania technicznego do jej realizacji oraz zidentyfikowanie źródeł błędów pomiarowych. Drugi etap objął projekt, instalację badania układu pomiarowego na obiekcie rzeczywistym, tj. na stacji redukcyjno-pomiarowej, oraz dokonanie oceny przydatności nowego typu przepływomierza. Szczegółowe wyniki obu etapów prac opisano kolejno w dwóch częściach artykułu.

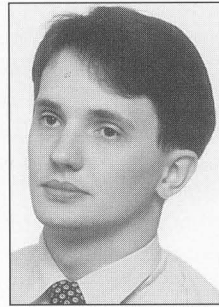
## 2. Metoda pomiaru

Najszerze zastosowanie w polskim gazownictwie znalazły metody: tachometryczna i manometryczna. Metoda tachometryczna wykorzystuje ruch obrotowy organu pomiarowego powstający dzięki siłom dynamicznym przepływającego medium. Danej prędkości przepływu odpowiada określona prędkość kątowna czujnika pomiarowego. Miarą przepływającej przez gazomierz objętości gazu jest liczba jego obrotów. Metoda manometryczna opiera się zaś na za-

mgr inż. Paweł SŁOMIŃSKI

absolwent Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Pracę magisterską obronił w 1997 r. Obecnie kierownik Działu Zakupu i Bilansowania Gazu w Pomorskiej Spółce Gazownictwa Sp. z o.o. i jednocześnie uczestnik zaocznego studium doktoranckiego na Wydziale Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej.

e-mail: pawel.slominski@psgaz.pl



mgr inż. Wojciech SŁOMIŃSKI

absolwent Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Tematem pracy dyplomowej było „Badanie przydatności przepływomierza termooanemometrycznego do pomiaru strumienia gazu w sieci dystrybucyjnej”. Obecnie jest uczestnikiem studium doktoranckiego w katedrze Metrologii i Systemów Elektronicznych macierzystego wydziału.

e-mail: wojtek@ortoslom.home.pl



leżności strumienia przepływu od spadku ciśnienia spowodowanego przez nieruchomy element umieszczony w rurociągu lub odpowiednio w nim ukształtowany. Realizacje techniczne obu metod nie umożliwiają jednak budowy przenośnego układu pomiarowego.

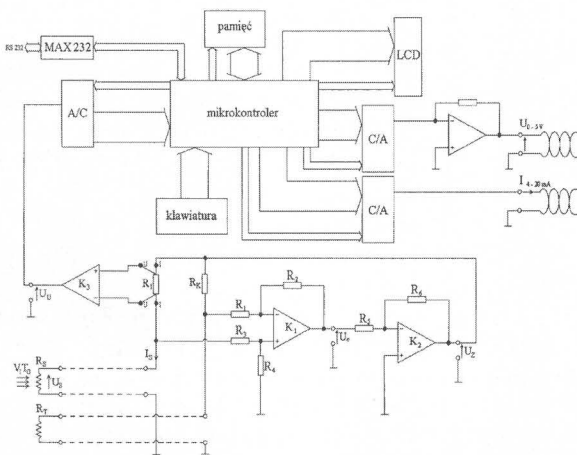
Taką możliwość daje metoda termooanemometryczna. Wykorzystuje się w niej zmianę intensywności wymiany ciepła pomiędzy płynącym medium a umieszczonym w nim elementem grzewczym. Najczęściej mierzoną wielkością jest prędkość przepływu gazu. Metodą termooanemometryczną analizuje się też rozkłady przestrzenne i czasowe prędkości. Pomiary polegają na umieszczeniu w badanym medium elementu pomiarowego o temperaturze różniącej się od temperatury medium i wyznaczeniu wielkości mierzonej z bilansu cieplnego. Typowo stosuje się tu rezystancyjny czujnik temperatury [1] ogrzewany tym samym sygnałem elektrycznym, który służy do wyznaczania temperatury i jest wygodny do dalszego przetwarzania. Medium przepływające w rurociągu powoduje chłodzenie umieszczonego w nim czujnika i zmienia wartość jego rezystancji. Mierząc spadek napięcia lub natężenie prądu w obwodzie czujnika, ze znanych współczynników wymiany ciepła i jego właściwości określa się miejscową wartość prędkości przepływu gazu [2], a na jej podstawie z powierzchni przekroju rurociągu oblicza się strumień masy gazu.

Według sposobu zasilania czujnika układy termooanemometryczne dzieli się na: stałotemperaturowe i stałoprądowe [3]. W pierwszych z nich utrzymuje się stałą rezystancję nagrzanego czujnika, czyli średnią wartość jego temperatury. Ze względu na dobre właściwości statyczne i dynamiczne układów stałotemperaturowych, używa się je najczęściej do mierzenia prędkości przepływu. Układy stałoprądowe mają gorsze parametry, lecz są stosowane do pomiarów szybkozmiennych fluktuacji temperatury oraz do kompensacji i korekcji temperaturowej.

## 3. Model przepływomierza termooanemometrycznego

Utrzymywanie stałej i niezależnej od warunków zewnętrznych temperatury czujnika uzyskuje się poprzez wymuszanie w nim odpowiedniego prądu, takiego aby jego rezystancja była stała. Prąd ten rośnie wraz ze wzrostem prędkości przepływu. Najczęściej stosuje w metrologii stałotemperaturowy układ mostkowy [3]. Poznanie pro-

blematyki współczesnych pomiarów przepływu metodą termooanemometryczną ułatwi stworzenie modelu działania typowego współczesnego przepływomierza termooanemometrycznego. Podano go na rys.1.1. Umożliwia on teoretyczną analizę układu pomiarowego ukazując zarówno jego zalety jak i źródła błędów. Model ten składa się z dwóch elementów: sondy pomiarowej i bloku głównego. Sonda pomiarowa jest instalowana w rurociągu. Na jej końcu znajdują się dwa czujniki: temperatury  $R_T$  i prędkości  $R_S$  włączone w sąsiednie ramiona mostka Wheatstone'a.  $R_S$  jest czujnikiem aktywnym podgrzewanym przez układ pomiarowy i chłodzonym przez przepływający gaz, zaś  $R_T$  jest czujnikiem odniesienia mierzącym temperaturę przepływającego medium. Sprężenie zwrotne utrzymuje tu stałą różnicę temperatury pomiędzy nimi, a więc jest to zmodyfikowany układ klasyczny o stałej temperaturze czujnika prędkości. Jego gałąź odniesienia nazywana jest też układem kompensacji.



Rys. 1.1. Schemat budowy współczesnego przepływomierza termooanemometrycznego

Budowa bloku głównego przepływomierza oparta jest na mikroprocesorze. Elementy mostka pomiarowego znajdują się zarówno w sondzie jak również i w bloku głównym. Łączy się je izolowanym kablem pięcioprzewodowym. Analogowy sygnał wyjściowy układu pomiarowego przetwarza się na sygnał cyfrowy przynajmniej 16 bitowym przetwornikiem analogowo - cyfrowym. Zapewnia to wystarczającą czułość i dokładność. Aby otrzymać pożądaną wielkość mierzoną sygnał pomiarowy trzeba odpowiednio przekształcić. Z wartości napięcia wyjściowego proporcjonalnego do prądu czujnika prędkości  $R_S$  wyznacza się prędkość przepływu gazu, a na podstawie jej wartości oraz czasu próbkowania i średnicy rurociągu - strumień objętości gazu transportowanego w warunkach normalnych.

Układ mikroprocesorowy bloku głównego służy realizacji następujących funkcji: pomiar strumienia objętości, regulacja zakresu, testowanie układu pomiarowego oraz diagnostyka. Wartość bieżącej objętości przepływającego gazu i sumator objętości można podać na wyświetlaczu. Komunikację z urządzeniem uzyskuje się za pomocą iskrobezpiecznych przycisków lub poprzez interfejs RS-232. Ponadto wyniki udostępnia się również w postaci stałoprądowych (DC) analogowych sygnałów wyjściowych: napięciowego (0-5 V) lub prądowego (4-20 mA). Sygnały te można uczynić proporcjonalne do objętości chwilowej przepływającego gazu przeliczonej na warunki normalne. Do otrzymania wartości strumienia objętości wystarczy wówczas określić jedynie czas próbkowania sygnału i odnieść wskazaną objętość do tego czasu. Zaletą takiego przepływomierza jest to, że nie wymaga on zastosowania innych czujników i przetworników do przeliczania na warunki normalne.

W części analogowej układu pomiarowego o schemacie z rys.1.1 występują zjawiska stwarzające największe problemy techniczne dla budowy urządzenia jak również pojawiają się źródła błędów istotnie wpływające na dokładność pomiaru. Część cyfrowa także generuje błędy, jednak ich wielkość można zaniedbać.

Przepływ medium o zróżnicowanej w czasie temperaturze jest nazywany nieizotermicznym. Wymaga on zastosowania układu

kompensacji temperaturowej. Ograniczenie wpływu zmian temperatury medium na wynik pomiaru dokonuje się poprzez kompensację w klasycznym mostkowym układzie termooanemometru stałotemperaturowego (lewa dolna część rys.1.1). W jednej z gałęzi mostka znajduje się czujnik prędkości  $R_S$  a w drugiej czujnik kompensacji temperaturowej  $R_T$ . Oba te czujniki mają zbliżony temperaturowy współczynnik rezystancyjny. Gdy temperatura czujnika kompensacyjnego zbliżona jest do temperatury medium to współczynnik nagrzania czujnika prędkości względem temperatury medium jest stały. Stanowi to warunek kompensacji temperaturowej prądu czujnika [4]. Z mostkiem rezystancyjnym  $R_1, R_S, R_K, R_T$  współpracuje wzmacniacz operacyjny  $K_1$ . Tworzy on wraz z rezystorami  $R_1, R_2, R_3, R_4$  węzeł sumacyjny układu o sprzężeniu zwrotnym, porównujący napięcia na obu sensorach i wytwarzający napięcie  $U_e$  sterujące wzmacniaczem  $K_2$ . Wzmacniacz ten wraz z rezystorami  $R_5, R_6$ , wzmacnia napięcie  $U_e$  do napięcia  $U_Z$  zasilającego mostek, tak aby pozostawał on w stanie równowagi wskutek ogrzewania czujnika  $R_S$ . W stanie ustalonym otrzymuje się:

$$R_S = R_T \frac{R_I}{R_K} \quad (1)$$

Czujniki wykonane są z tego samego odpowiednio czystego materiału i mają w praktyce taki sam temperaturowy współczynnik rezystancji  $\alpha$  oraz przyjmuje się, że jest spełniony warunek kompensacji temperaturowej prądu czujnika termooanemometrycznego. Wartość prądu  $I_S$  czujnika prędkości  $R_S$  zależy wówczas od prędkości i temperatury przepływającego medium. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu układ zwiększa napięcie  $U_Z$  tak, aby utrzymać stałą temperaturę, czyli stałą rezystancję czujnika prędkości. Zwiększa się wtedy również prąd płynący przez czujnik temperatury. Zwiększony prąd mógłby spowodować nagrzewanie się czujnika, co może spowodować błędy pomiaru temperatury. Jeśli rezystancja czujnika kompensacyjnego nie będzie odpowiadała temperaturze badanego medium to nie nastąpi kompensacja temperaturowa. Unika się tego stosując czujniki o znacznie różniących się rezystancjach, tj.  $R_T \gg R_S$ . Działanie czujnika termooanemometrycznego opisuje następujący wzór

$$I_S^2 = \underbrace{\left( A + BV^n \right)}_{\text{funkcja mierzonej prędkości przepływu}} \underbrace{\left( 1 - \frac{R_G}{R_W} \right)}_{\text{wpływ temperatury medium na pomiar}} \quad (2)$$

mierzony sygnał wyjściowy

gdzie:

$I_S$  - prąd czujnika [A]

$V$  - mierzona prędkość przepływu medium [m/s]

$R_W$  - rezystancja nagrzanego czujnika [ $\Omega$ ]

$R_G$  - rezystancja czujnika w temperaturze medium [ $\Omega$ ]

$A, B, n$  - parametry modelu

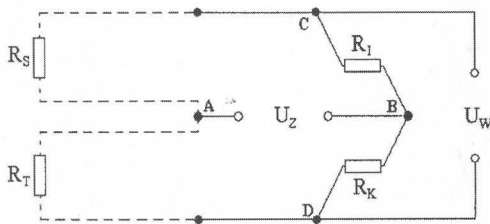
Wykorzystując ten model matematyczny oraz liniową zależność rezystancji czujnika od jego temperatury otrzymuje się zależność sygnału wyjściowego od prędkości przepływu gazu: (podaną po raz pierwszy przez Kinga)

$$U_U = R_I \sqrt{\left( A + BV^n \right) \left( 1 - \frac{R_{S0}}{R_{T0}} \frac{R_K}{R_I} \right)} \quad (3)$$

Nieliniowość tej charakterystyki jest pewną niedogodnością układu pomiarowego i ma swój udział w błędzie pomiarowym. Jednak wpływ ten można zminimalizować poprzez zastosowanie linearyzacji realizowanej w mikroprocesorze bloku głównego. Takie rozwiązanie umożliwia stosunkowo łatwe posłużenie się skomplikowanymi algorytmami do linearyzacji danej charakterystyki.

Istotną wadą stałotemperaturowego mostka termooanemometrycznego jest zasilanie czujnika aktywnego poprzez linię dwuprzewodową, gdyż wynik pomiaru zależy od rezystancji tej linii. Rys. 1.2 przedstawia schemat mostka ilustrujący tę zależność.

Linia przerywaną oznaczono długie przewody, których wartość rezystancji  $R_L$  jest na tyle duża, że jej wpływu nie można pominąć.



Rys.1.2. Schemat mostka pomiarowego przepływomierza 640S

Stan równowagi mostka z uwzględnieniem rezystancji doprowadzeń opisuje wzór

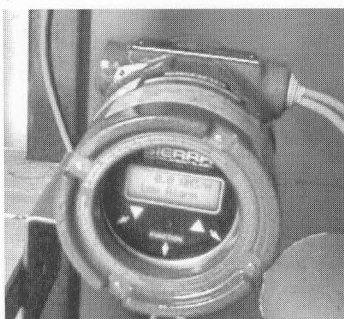
$$R_S R_K + 2R_L R_K = R_T R_I + 2R_L R_I \quad (4)$$

Zminimalizowanie wpływu rezystancji linii następuje, gdy mostek znajduje się blisko stanu równowagi. Kiedy układ oddala się od tego stanu to wpływ rezystancja linii na napięcie niezrównoważenia mostka jest coraz większy, dlatego też przepływomierz powinien pracować w stanie jak najbardziej zbliżonym do idealnego zrównoważenia. Do wykrywania stanu równowagi układ mostkowy stosuje się detektor zera [5]. Taką właśnie rolę w schemacie z rys.1.1 pełni sumator oparty na wzmacniaczu operacyjnym.

#### 4. Przepływomierz termooanemometryczny 640S

Przykładem realizacji w praktyce modelu przedstawionego na rys 1.1, jest przepływomierz typu 640 S firmy Sierra Instruments (rys.1.3). Jego dane techniczne są następujące [6]: dokładność odczytu  $\pm 2\%$ , bezpośredni pomiar przepływu masowego, szeroki zakres pomiaru 1:300, mała zwłoka czasowa 0,1s, duża czułość nawet na małe prędkości przepływu od 0,07 m/s, brak części ruchomych, mały spadek ciśnienia 0,24 kPa na czujniku, dwa rodzaje sygnałów wyjściowych: napięciowy i prądowy. Przyrząd ten składa się z dwóch podzespołów: sondy pomiarowej i bloku głównego. Istnieje też możliwość użycia zespołu montażowego do wprowadzania sondy do gazu pod ciśnieniem, czyli bez konieczności przerywania przepływu gazu. Producent dostarcza wg potrzeb różne konfiguracje przepływomierza, np. bez kabla transmisyjnego - gdy blok główny jest bezpośrednio połączony z sondą lub z kablem transmisyjnym o dowolnej długości. Przepływomierz 640S mierzy przy zmiennej temperaturze medium, gdyż jego konstrukcja jest układem stałotemperaturowym, zmodyfikowanym poprzez dodanie układu odniesienia. Na końcu sondy pomiarowej zamontowane są dwa precyzyjne termorezystory platynowe będące czujnikami prędkości i temperatury [7]. Sonda pomiarowa przepływomierza 640S służy do pomiarów w jednym punkcie. Należy ją tak wprowadzać do rurociągu, tak, aby punkt pomiarowy znalazł się dokładnie w jego osi. Stosowanie sond jednopunktowych ogranicza się do rurociągów o małych i średnich średnicach, w których profil prędkości gazu można traktować jako równomierny lub dla przepływów o znanym innym profilu z przesunięciem sondy do punktu o średniej prędkości [6].

Zmiana średnicy rurociągu w stosunku od średnicy użytej podczas kalibracji nie powoduje konieczności ponownej kalibracji urządzenia. Producent podaje sposób przeliczania wartości wskazywanej przez gazomierz na odpowiednią wartość średnicy rurociągu. Należy wskazania przepływomierza podzielić przez współczynnik będący stosun-



Rys. 1.3. Przepływomierz termooanemometryczny 640S firmy Sierra Instruments

kiem powierzchni przekroju dla średnicy użytej w kalibracji do powierzchni przekroju rurociągu, na którym dokonano instalacji urządzenia. Istotne jest by licząc powierzchnię przekroju dla danej średnicy odjąć powierzchnię zajmowaną przez sondę wg zależności

$$P = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 - a \left( \frac{d}{2} + b \right) + \pi c^2 \quad (5)$$

gdzie: P - pole przekroju [mm<sup>2</sup>]

d - średnica rurociągu [mm]

a - szerokość sondy

b - odległość osi rurociągu od końca sondy

c - promień otworu na końcu sondy

#### 5. Analiza błędów układu pomiarowego

Dla przeprowadzenia analizy błędów przepływomierzy termooanemometrycznych konieczne było ustalenie wartości poszczególnych elementów modelu niedostępnych w materiałach dostarczonych przez producenta. Wartości tych elementów ustalono na drodze symulacji przeprowadzonej w programie PSpice dopasowując tak te wartości, aby jak najlepiej odzwierciedlono zachowanie rzeczywistego układu pomiarowego określonego w certyfikacie kalibracji przepływomierza 640S.

Przepływomierz termooanemometryczny o działaniu wg podanego modelu wykorzystuje pośrednią metodę pomiaru, tj. wielkość poszukiwaną wyznacza się z pomiarów jednej lub kilku innych wielkości. Strumień objętości mierzy się tu poprzez pomiar prędkości  $V$  przepływu medium. Prędkość ta jest reprezentowana w części analogowej przepływomierza przez napięcie wyjściowe  $U_U$ . Zależność wielkości poszukiwanej i mierzonej jest ściśle określona równaniem pomiaru. Dla przepływomierza termooanemometrycznego równanie to jest ogólnie funkcją następujących wielkości [8]:

$$U_U = f(V, T, R_K, R_I, K, U_N) \quad (6)$$

Dla przyjętego modelu układu pomiarowego funkcja pomiaru przyjmuje następującą postać:

$$U_U = \frac{R_I}{R_I + R_{S0} (1 + \alpha (T_W - T_0))} \frac{R_{S0} (1 + \alpha (T_W - T_0)) \sqrt{(A + B V^n) \left( 1 - \frac{R_{S0} (1 + \alpha (T_G - T_0))}{R_{S0} (1 + \alpha (T_W - T_0))} \right)} + U_N}{\frac{R_{T0} (1 + \alpha_T (T - T_0))}{(R_{T0} (1 + \alpha_T (T - T_0)) + R_K)} - \frac{1}{K}}$$

gdzie:

$U_N$  - napięcie niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego [V]

T - pomierzona temperatura przepływającego medium [K]

$T_W$  - temperatura nagrzanego czujnika prędkości 413,15 K

$T_G$  - temperatura nie nagrzanego czujnika prędkości [K]

$T_0$  - temperatura odniesienia 273,15 K

$R_{S0}$  - rezystancja czujnika prędkości w temperaturze odniesienia 17,83  $\Omega$

$R_{T0}$  - rezystancja czujnika kompensacji w temperaturze odniesienia 300,5  $\Omega$

$\alpha$  - temperaturowy współczynnik rezystancji materiału czujnika prędkości w temperaturze odniesienia 0,003887 1/K

$\alpha_T$  - temperaturowy współczynnik rezystancji materiału czujnika temperatury w temperaturze odniesienia 0,003893 1/K

K - wzmacnienie całego układu

Z równania (7) wynika, iż mierzone napięcie wyjściowe układu pomiarowego jest zależne przede wszystkim od prędkości przepływu gazu  $V$  oraz od pomiaru temperatury przez czujnik kompensacyjny T, od wartości rezystancji  $R_I$  i  $R_T$ , od całkowitego wzmacnienia układu K oraz od napięcia niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego  $U_N$ .

Równanie błędów układu wyznacza się z różniczki zupełnej:

$$\Delta U_U = \frac{\partial f}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial f}{\partial R_K} \Delta R_K + \frac{\partial f}{\partial R_I} \Delta R_I + \frac{\partial f}{\partial K} \Delta K + \frac{\partial f}{\partial U_N} \Delta U_N \quad (8)$$

Poszczególne pochodne cząstkowe są nazywane współczynnikami wrażliwości. Różniczka zupełna w pełni opisuje jedynie przy-



rost funkcji liniowej, zaś dla funkcji nieliniowej aproksymuje go tylko w przybliżeniu, tym dokładniej im jest on mniejszy.

Bezwzględny błąd całkowity otrzymujemy więc wg (8) poprzez sumowanie cząstkowych błędów bezwzględnych, definiowanych jako iloczyn współczynnika wrażliwości i przyrostu wartości określonego argumentu, np.  $\Delta(T)$  to błąd cząstkowy od argumentu funkcji błędu  $T$ . Podobnie oblicza się błąd względny, np.  $\delta(K)$ , od argumentu  $K$  odnosząc błąd bezwzględny do wartości funkcji, czyli w tym przypadku napięcia wyjściowego  $U_U$ .

Analizę błędów cząstkowych przeprowadzono według następującego schematu. Na początku wyprowadzono wzory na poszczególne współczynniki wrażliwości, które ze względu na ograniczoną objętość artykułu nie zostały zaprezentowane. Następnie w celu zbadania wpływu danego błędu cząstkowego wybrano trzy różne wartości odchyżeń od wartości nominalnej dla których dokonano obliczeń względnych błędów cząstkowych. Wyniki ukazały, iż ich wartości nie zależą od strumienia objętości, czyli od prędkości przepływu. Uzyskane dane zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Wartości względnych błędów dla różnych przyrostów argumentów funkcji błędu

błąd względny	przyrost wartości argumentu funkcji błędu		
	najmniejszy	średni	największy
$\delta(R_K)$	0,082%	0,408%	0,817%
$\delta(R_I)$	0,012%	0,062%	0,122%
$\delta(K)$	-0,007%	-0,033%	-0,065%
$\delta(T)$	-0,147%	-0,293%	-0,581%

Spośród wszystkich źródeł błędów największy wpływ na bezwzględny błąd całkowity ma tolerancja rezystora  $R_K$  i błąd pomiaru temperatury  $T$ . Błąd cząstkowy związany z całkowitym wzmocnieniem przyjmuje wartości najmniejsze. Natomiast wpływ dokładności rezystora  $R_I$  na błąd całkowity jest ponad dwukrotnie większy niż wpływ wzmocnienia układu. Otrzymane wyniki potwierdzają, że istotne dla poprawnego działania układu pomiarowego jest osiągnięcie przez mostek stanu bardzo zbliżonego do równowagi. Te czynniki, które bezpośrednio wpływają na możliwość osiągnięcia tego stanu charakteryzują się największym udziałem w błędzie pomiarowym.

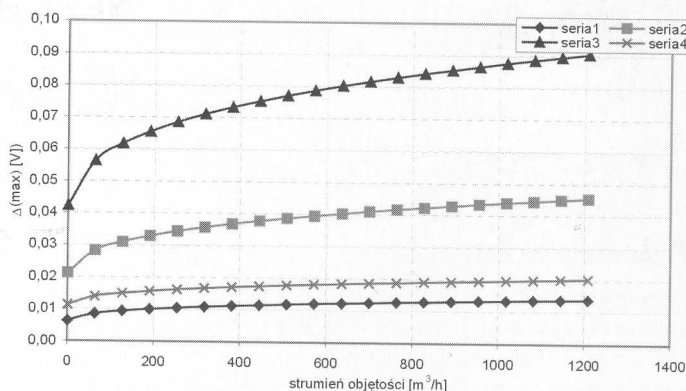
Przeprowadzona analiza dotyczyła również wpływu na wielkość błędu napięcia niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego. Podczas obliczeń, których wyniki zaprezentowano powyżej, przyjęto wartość tego napięcia równą zero. Napięcie niezrównoważenia wzmacniacza  $K_1$  pracującego jako wzmacniacz różnicowy potraktowano jako sumaryczne napięcie niezrównoważenia wszystkich wzmacniaczy. Wybrano następujące napięcia niezrównoważenia: 1 mV, 0,5 mV i 0,1 mV. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2.

błąd bezwzględny	wartość napięcie niezrównoważenia		
	0,1 mV	0,5 mV	1 mV
$\Delta(U_N)$ [V]	0,0004	0,0022	0,0043

W teorii błędów, jednym ze sposobów analitycznego opisu niepewności pomiaru jest wypadkowy błąd maksymalny  $\Delta(\max)$ . Przy jego obliczeniu zakłada się najgorszy przypadek sumowania się wartości bezwzględnych wszystkich błędów cząstkowych od siebie niezależnych. Przyjmuje się więc, iż błędy składowe mają wartości maksymalne i jednakowe znaki. Jest to tak zwana metoda sumy zwykłej, algebraicznej. Rys. 1.4 ukazuje zależność błędu maksymalnego od wartości strumienia objętości dla różnych przyrostów argumentów funkcji błędu - wzór (8). Krzywa oznaczona jako „seria 1” prezentuje błąd maksymalny dla najmniejszych wartości przyrostów ilościowych danego błędu cząstkowego. Natomiast krzywe „seria 2” i „seria 3” przedstawiają maksymalny błąd obliczony odpowiednio dla średnich i największych wartości tych przyrostów.

Można zauważyć, że wartości bezwzględnych błędów cząstkowych były zarówno dodatnie jak i ujemne. Obliczając błąd maksymalny wg jego definicji poprzez sumowanie poszczególnych błędów cząstkowych pomija się znak zakładając najgorszy z możliwych przypadków. Jednak jest on mało prawdopodobny co oznacza, że stosując



Rys. 1.4 Zależność błędu maksymalnego  $\Delta(\max)$  od strumienia objętości dla różnych wartości przyrostów argumentów funkcji błędu

tę metodę zawyza się niepewność pomiaru. W rzeczywistości może nastąpić zjawisko kompensacji błędu. Dlatego też, błąd danego urządzenia może być mniejszy niż wynikający z obliczonego błędu maksymalnego. W naszym przypadku błąd całkowity jest znacznie mniejszy od wartości błędu maksymalnego. Ukazuje nam to krzywa oznaczona jako „seria 4” na rysunku 1.4. Prezentuje ona zależność błędu całkowitego dla takich samych warunków jak dla „serii 3” ale z uwzględnieniem znaku błędów cząstkowych.

## 6. Podsumowanie

W pierwszej części pracy omówiono zasadę działania i podano model umożliwiający opis właściwości gazomierza termooanemometrycznego. Przeprowadzona analiza pozwala m.in. na ocenę źródeł błędów i wskazuje, że układy pomiarowe tego typu charakteryzują się małym błędem pomiarowym. Dla uzyskania jak najdokładniejszego wyniku należy zadbac o największą dokładnością rezystora  $R_K$  i układu pomiaru temperatury medium. Oznacza to konieczność zastosowania rezystora z jak najmniejszą wartością tolerancji i jak również możliwie najdokładniejszego czujnika temperatury. Oceniając dokładność układu pomiarowego należy także wziąć pod uwagę, czy prąd zasilający czujnik temperatury nie powoduje jego nagrzewania się, pogarszając dokładność pomiaru.

Przykładem technicznej realizacji termooanemometrycznej metody pomiaru przepływu jest gazomierz firmy Sierra Instruments. Zaproponowany model teoretyczny dobrze opisuje jego właściwości. Konstrukcja przyrządu 640S umożliwia łatwy i szybki montaż, dzięki czemu można go stosować jako przepływomierz kontrolny. Nie wymaga on zastosowania układów do pomiaru ciśnienia i temperatury gazu, co jest dużą zaletą w porównaniu z gazomierzami tachometrycznymi lub manometrycznymi.

Wyniki rozważań teoretycznych wymagały zweryfikowania poprzez pomiary na rzeczywistym obiekcie. Próby te opisano w następnym artykule.

## 7. Literatura

- [1] Biernacki Z., Złoto T., Kurkowski M.: Sensory termooanemometryczne w pomiarach parametrów medium w układzie hydraulicznym, PAK nr 6 2001r.
- [2] Biernacki Z.: Sensory i systemy termooanemometryczne, WKiŁ Warszawa 1997r.
- [3] Ligęza P.: Układy termooanemometryczne - struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe, ? Kraków 2001r.
- [4] Ligęza P., Poleszczyk E., Rysz J.: Anemometr stałotemperaturowy w pomiarach przepływów nieizotermicznych, Materiały XVII Zjazdu Termodynamików Kraków 1999r
- [5] Warowny W., Dydkowska E.: Wybrane zagadnienia termometrii w gazownictwie, Nowoczesne Gazownictwo nr 3 1999r.
- [6] Dokumentacja techniczna: Przepływomierz 640 Series Steel-Mass, firma Sierra Instruments
- [7] Fatek J., Warsza Z.: Aparatura do pomiarów poziomu i przepływów, PAK nr 6 1998r.
- [8] Analiza błędów i niepewności pomiarów, publikacja na stronie WWW Katedry Mi SE Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, 2004

**Title:** Stream of natural gas measurement by thermoanemometer - part I theoretical analysis