

Zintegrowana sonda do wielopunktowych, współczesnych pomiarów pól temperatury i prędkości przepływu gazu

PAWEŁ LIGĘZA, ELŻBIETA POLESZCZYK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

W pracy przedstawiono założenia, koncepcję i konstrukcję sondy termooptometrycznej do wielopunktowych, współczesnych pomiarów pól temperatury i prędkości przepływu gazu. Matryca takich sond wraz z układem akwizycji danych znajduje zastosowanie w przenośnym systemie pomiarowym. Omówiono budowę sondy oraz zaprezentowano możliwość realizacji sondy w różnych wariantach. Poszczególne odmiany sondy umożliwiają pomiar temperatury, prędkości przepływu, detekcję zwrotu przepływu oraz pomiar przepływów szybkozmiennych. W pracy podano także potencjalny zakres zastosowań sondy pomiarowej.

Słowa kluczowe: metrologia przepływów, pomiary wielopunktowe, sonda pomiarowa, system akwizycji danych

1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych zagadnień metrologii przepływów są wielopunktowe, współczesne pomiary prędkości przepływu płynów. Zagadnienie to może wynikać z konieczności jednoczesnego śledzenia parametrów medium w różnych punktach badanego obiektu. Często problemem jest również konieczność badania pól prędkości, w tym profilu prędkości w zadanym przekroju. W szczególności pomiary takie są istotne dla wyznaczenia strumienia objętości przepływającego płynu w przekroju o niejednorodnym rozkładzie prędkości, co jest ważne dla sporządzenia bilansu płynu, na przykład w zagadnieniach wentylacyjnych [1, 2]. Strumień objętości Q w przekroju S związany jest z prędkością przepływu v równaniem:

$$Q = \int_S v dS \quad (1)$$

przy czym v jest składową prędkości prostopadłą do elementu dS . Wyznaczenie strumienia objętości w oparciu o skończoną ilość punktowych pomiarów prędkości wymaga zastosowania odpowiedniej metody aproksymacyjnej. Jedną z metod jest wyznaczenie w przekroju prędkości średniej \bar{v} i obliczenie strumienia objętości z zależności:

$$Q = \bar{v}S \quad (2)$$

Prędkość średnią wyznacza się na podstawie punktowych pomiarów prędkości w wybranych N punktach przekroju jako średnią arytmetyczną:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (3)$$

lub jako średnią ważoną:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i v_i \quad (4)$$

gdzie: k_i – wagi poszczególnych prędkości punktowych wyznaczone na drodze rozważań teoretycznych lub empirycznie.

Możliwy jest też podział badanego przekroju na N przekrojów cząstkowych S_1 do S_N i wyznaczenie strumienia objętości jako sumy strumieni w wybranych przekrojach:

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (5)$$

W takim przypadku po umieszczeniu w każdym przekroju cząstkowym czujnika pomiaru prędkości możliwa jest estymacja strumienia objętości przepływającego płynu z zależności:

$$Q = \sum_{i=1}^N v_i S_i \quad (6)$$

W metodach tych pomiar strumienia objętości dokonywany jest na podstawie punktowych pomiarów prędkości. W przypadku gdy prędkość przepływu jest zmienna zarówno w przestrzeni jak i w czasie konieczne jest zastosowanie metody umożliwiającej pomiary punktowe i spełniającej zadane kryteria dynamiczne. Metodą taką może być metoda termooanemometryczna [3]. W pracy omówiono konstrukcję sondy termooanemometrycznej do zastosowań w systemie wielopunktowych pomiarów pól temperatury i prędkości przepływu gazu. Przy opracowaniu koncepcji systemu pomiarowego przyjęto następujące założenia:

- sondy umożliwiające pomiar zbliżony do punktowego,
- niewielka inwazyjność sond pomiarowych,
- możliwość dokonywania pomiarów dynamicznych,
- przystosowanie sond do pracy w warunkach przemysłowych,
- zastosowanie platynowo-ceramicznych cienkowarstwowych czujników pomiarowych,
- stałotemperaturowy tryb pracy czujników pomiarowych,
- indywidualna kompensacja temperaturowa każdej sondy pomiarowej,
- integracja sondy z elektronicznym układem przetwarzania sygnału pomiarowego,
- wspólny system akwizycji sygnałów pomiarowych i zasilania sond.

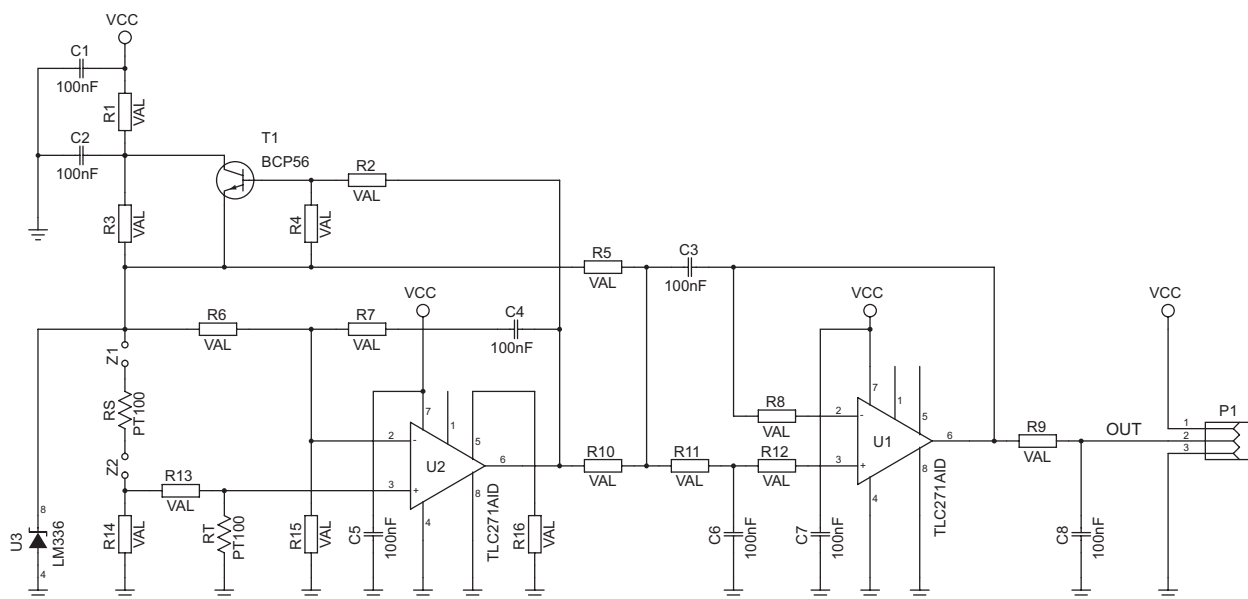
W skład systemu wchodzi sondy termooanemometryczne zintegrowane z układem przetwarzania sygnału oraz układ akwizycji danych pomiarowych z poszczególnych sond. Rozmieszczenie sond pomiarowych w wybranych punktach badanego przepływu, a następnie rejestracja i przetwarzanie sygnałów z poszczególnych sond umożliwia współczesowy pomiar pola temperatury i prędkości oraz wyznaczenie strumienia objętościowego przepływu płynu. Poza pomiarem temperatury i prędkości opracowano również warianty sondy do detekcji zwrotu przepływu oraz do pomiarów przepływów szybkozmiennych.

2. Konstrukcja sondy pomiarowej

Konstrukcja sondy powstała w oparciu o termooanemometrycznego układu pomiarowego, w którym w głowicy pomiarowej czujnik przyłączony jest bezpośrednio do mostka stałotemperaturowego i układu przetwarzania sygnału. Układ elektroniczny realizowany jest w technologii SMT, co pozwala na uzyskanie niewielkich rozmiarów głowicy, przy dobrych parametrach elektrycznych i termicznych [4]. Na wspólnej płycie drukowanej z układem elektronicznym montowane są czujniki termooanemometryczne. Dodatkowo w głowicy z kompensacją temperaturową [5] umieszczony jest czujnik pomiaru temperatury. Sygnałem wyjściowym z głowicy jest napięcie zależne od mierzonej prędkości przepływu płynu. Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie dobrych parametrów metrologicznych układu przy zwiększonej odporności na zakłócenia i niewielkim koszcie głowicy pomiarowej. Umożliwia to wygodne prowadzenie pomiarów wielopunktowych przy zastosowaniu wielu głowic.

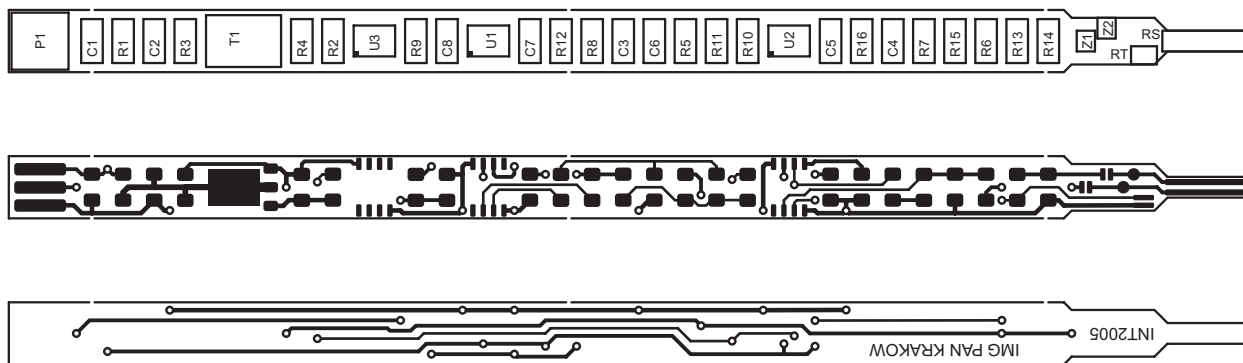
Schemat ideowy sondy pomiarowej przedstawiono na rys. 1.

W zależności od rodzaju elementów pomiarowych, obsadzenia i wartości poszczególnych elementów elektronicznych realizowane są różne warianty sondy. Możliwa jest realizacja układu stałoprądowego do pomiarów termometrycznych oraz układu stałotemperaturowego do pomiarów termooanemometrycznych [6]. Termooanemometr stałotemperaturowy pracuje w zmodyfikowanym układzie mostkowym z kompensacją



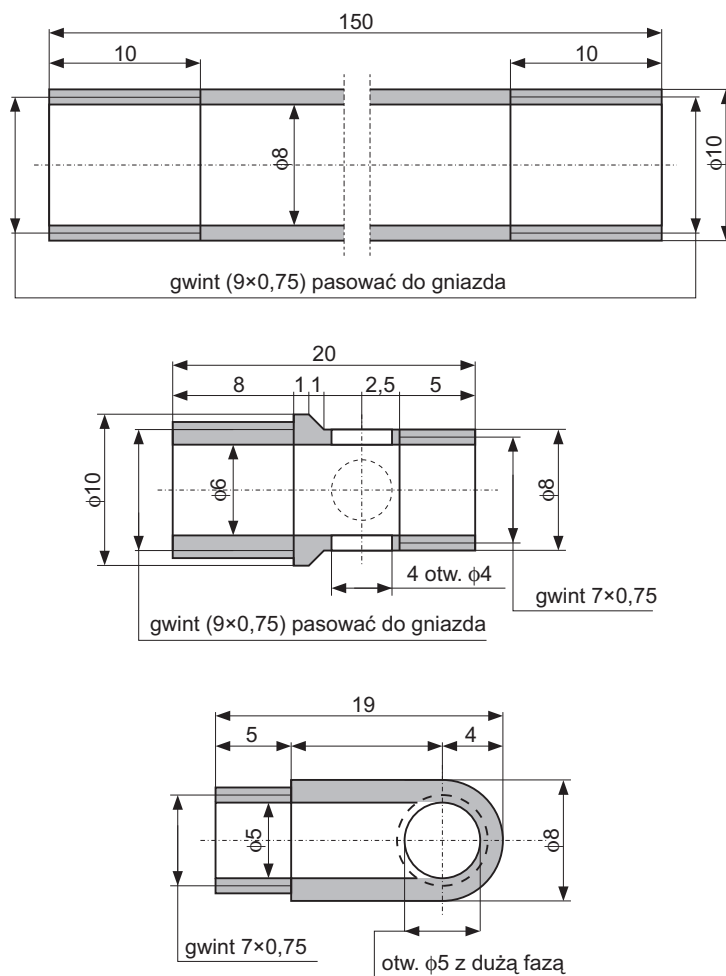
Rys. 1. Schemat ideowy zintegrowanej sondy termooanemometrycznej

temperatury. Po zastąpieniu elementów kompensacji temperaturowej rezystorami układ nie jest skompensowany. Jako elementy pomiarowe mogą zostać zastosowane czujniki platynowo-ceramiczne lub czujniki drutowe do pomiaru przepływów szybkozmiennych. Sonda symetryczna złożona z dwóch identycznych termooanemometrów umożliwia detekcję zwrotu wektora prędkości. Rys. 2. przedstawia widok płytki montażowej sondy zintegrowanej wraz z rozmieszczeniem poszczególnych elementów.



Rys. 2. Płytki montażowej zintegrowanej sondy termooanemometrycznej

Elementy na płycie umieszczone są jednostronnie, co umożliwia złożenie dwóch płytek w przypadku sondy symetrycznej. Sonda pomiarowa umieszczona jest w obudowie złożonej z rurki miedzianej zakończonej z jednej strony złączem kontaktowym, a z drugiej strony dwuelementową osłoną z tworzywa sztucznego z otworami dla czujników pomiarowych. Pierwszy element osłania czujnik pomiaru i kompensacji temperaturowej, a drugi element osłania czujnik termooanemometryczny. Drugi element osłony może być obracany względem czujnika termooanemometrycznego dla ustalenia właściwego kierunku napływu powietrza na czujnik. Istnieje też możliwość zdjęcia tego elementu w celu minimalizacji zaburzenia strugi przez osłonę czujnika. Na rys. 3. przedstawiono elementy składowe obudowy sondy.



Rys. 3. Elementy obudowy zintegrowanej sondy termoelementarnej

Rysunek 4 przedstawia rysunek złożeniowy sondy w obudowie. Widoczne jest złącze kontaktowe sondy 1, rurka miedziana osłaniająca układ elektroniczny sondy 2, osłona czujnika kompensacji temperatury 3, osłona czujnika termoelementarnej 4, czujnik kompensacji temperatury 5 oraz czujnik termoelementarnej 6.



Rys. 4. Rysunek złożeniowy zintegrowanej sondy termoelementarnej w obudowie

Opracowano następujące typy sond pomiarowych zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału pomiarowego:

- INT 05 TP – sonda pomiaru temperatury, czujnik platynowo-ceramiczny, zakres pomiarowy – 20 do 100°C, pasmo przenoszenia 0.05 Hz,
- INT 05 TW – sonda pomiaru temperatury, czujnik wolframowy drutowy 5 μ m, zakres pomiarowy – 20 do 100°C, pasmo przenoszenia 100 Hz,

- INT 05 AP – sonda pomiaru prędkości z kompensacją temperatury, czujnik platynowo-ceramiczny, zakres pomiarowy 0 do 50 m/s, pasmo przenoszenia 20 Hz,
- INT 05 AW – sonda pomiaru prędkości z kompensacją temperatury, czujnik wolframowy drutowy 5 μm , zakres pomiarowy 0 do 50 m/s, pasmo przenoszenia 20 kHz,
- INT 05 DAP – dwukierunkowa sonda pomiaru prędkości z kompensacją temperatury, czujnik platynowo-ceramiczny, zakres pomiarowy 0 do 50 m/s, pasmo przenoszenia 20 Hz,
- INT 05 DAW – dwukierunkowa sonda pomiaru prędkości z kompensacją temperatury, czujnik wolframowy drutowy 5 μm , zakres pomiarowy 0 do 50 m/s, pasmo przenoszenia 20 kHz.

W skład systemu pomiarowego wchodzi sonda termooanemometryczna zintegrowana z układem przetwarzania sygnału oraz układ akwizycji danych pomiarowych z poszczególnych sond. Układ akwizycji danych pracuje w oparciu o wielofunkcyjny moduł DAQ na USB typ: NI USB-6009 firmy National Instruments o następujących parametrach:

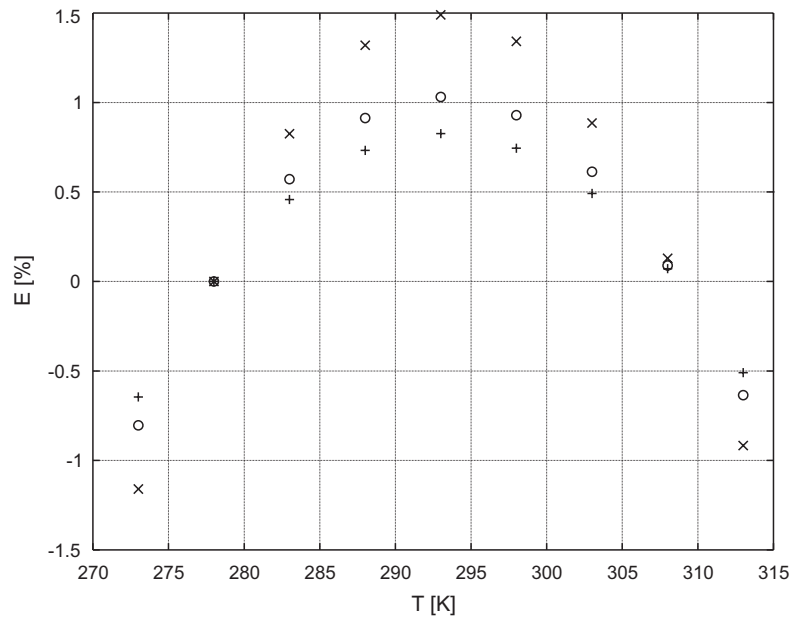
- ilość kanałów pomiarowych – 8,
- rozdzielczość przetwarzania A/C – 14 bitów,
- częstotliwość próbkowania – 48 kS/s.

Istnieje możliwość zastosowania dwóch modułów w celu zwiększenia ilości kanałów pomiarowych. Moduły współpracują z notebookiem Toshiba Satellite L10 – 118. System pomiarowy posiada autonomiczne zasilanie i jest w pełni mobilny. Rozmieszczenie sond pomiarowych w wybranych punktach badanego pola prędkości, a następnie rejestracja i przetwarzanie sygnałów z poszczególnych sond umożliwia współczesny pomiar pola temperatury i prędkości oraz intensywności turbulencji, a także wyznaczenie strumienia objętościowego.

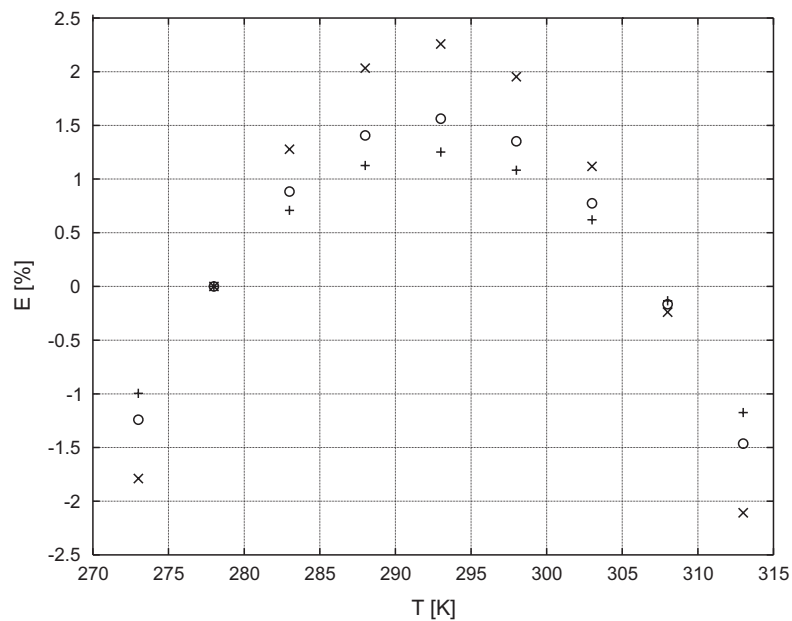
3. Badania modelowe sondy pomiarowej

W celu optymalizacji sondy pomiarowej ze względu na efektywność kompensacji temperaturowej opracowano statyczny model sondy oraz przeprowadzono symulacyjne badania modelowe. Badania przeprowadzono w języku MATLAB będącym uniwersalnym interaktywnym środowiskiem do wykonywania naukowych obliczeń i ich wizualizacji. Symulowano pracę sondy w przepływie o zmiennej prędkości i temperaturze. Modelowano pracę dwóch rodzajów sond pomiarowych: sondy z termooanemometrycznym czujnikiem platynowo-ceramicznym oraz sondy z czujnikiem z drutu wolframowego. W obu przypadkach jako czujnik kompensacyjny zastosowano czujnik platynowo-ceramiczny. Badania symulacyjne polegały na takim doborze wartości elementów w układzie sondy, aby uzyskać minimalny błąd kompensacji temperaturowej w zadanym zakresie pomiarowym. Rezultaty badań symulacyjnych w zakresie temperatur od 0 do 40°C dla sondy z czujnikiem platynowo-ceramicznym przedstawiono na rys. 5, a dla sondy z czujnikiem wolframowym na rys. 6.

Wykresy przedstawiają zależność względnego błędu pomiaru prędkości od temperatury medium dla trzech prędkości przepływu: 1 m/s (x), 5 m/s (o) oraz 25 m/s (+). Jest to miara efektywności zastosowanego układu kompensacji temperaturowej sondy. W przypadku sondy z czujnikiem platynowo-ceramicznym w badanym przedziale temperatur maksymalny błąd pomiarowy nie przekracza 2.5% dla prędkości 1 m/s i maleje ze wzrostem prędkości. Dla prędkości 25 m/s maksymalny błąd pomiarowy nie przekracza 1.5%. W przypadku sondy z czujnikiem wolframowym błąd jest mniejszy. W badanym przedziale temperatur maksymalny błąd pomiarowy nie przekracza 1.5% dla prędkości 1 m/s i maleje ze wzrostem prędkości. Dla prędkości 25 m/s maksymalny błąd pomiarowy nie przekracza 1.0%. Wyniki te uzyskano na drodze symulacji komputerowej, natomiast ich weryfikacja eksperymentalna możliwa jest do przeprowadzenia w tunelu aerodynamicznym o zmiennej temperaturze medium.



Rys. 5. Zależność błędu pomiarowego sondy z czujnikiem platynowo-ceramicznym od temperatury medium



Rys. 6. Zależność błędu pomiarowego sondy z czujnikiem drutowym wolframowym od temperatury medium

4. Wnioski

Sondy pomiarowe i oparty na nich system został opracowany dla przeprowadzenia eksperymentalnej weryfikacji numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku górniczym. System jest przystosowany do specyficznych warunków pracy w kopalni (przepływ nieustalony i nieizotermiczne o znacznym zanieczyszczeniu i wilgotności). Termooanemometryczny system pomiarowy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości jest oparty na czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Matryca takich czujników rozmieszczonych w badanym przekroju wyrobiska współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych. Umożliwia to współczesowy, wielopunktowy pomiar prędkości przepływu w badanym przekroju. W czujnikach zastosowano oryginalny układ pomiarowy oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury. Nowe rozwiązanie

technologiczne polega również na zastosowaniu do pomiaru przepływów wolnozmiennych miniaturowych cienkowarstwowych sensorów platynowo-ceramicznych, jako czujnika anemometrycznego i kompensującego. Czujniki takie posiadają bardzo dobrą stabilność czasową i temperaturową oraz dużą odporność mechaniczną, co jest szczególnie istotne w zastosowaniu do układu termooanemometrycznego przeznaczonego do pomiarów w warunkach kopalnianych. Do pomiaru szybkozmiennych fluktuacji prędkości opracowano czujniki, w których elementem pomiarowym jest drut wolframowy o średnicy kilku mikrometrów. Oba typy czujników mogą pracować również w układzie podwójnym z detekcją zawrotu wektora prędkości. Opisane sondy i system pomiarowy mogą znaleźć zastosowanie także w innych zagadnieniach badawczych metrologii przepływów.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2005 jako projekt badawczy nr 4 T12A 059 26 pt.: „Zastosowanie zmodyfikowanej termooanemometrycznej metody pomiaru prędkości gazu w specyficznych warunkach kopalnianych”.

5. Literatura

- [1] Roszczyniański W., Trutwin W., Waclawik J.: *Kopalniane pomiary wentylacyjne*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1992.
- [2] Waluś St.: *Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia, Gliwice 2003.
- [3] Bruun H. H.: *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*, Oxford, University Press, Oxford 1995.
- [4] Ligęza P.: *Integracja czujnika termooanemometrycznego z układem pomiarowym*, Materiały IV Konferencji COE, Szczyrk 1996.
- [5] Ligęza P.: *A modified temperature – compensation circuit for CTA*, Meas. Sci. Technol., 3, 1998.
- [6] Ligęza P.: *Układy termooanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*, Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie nr 98, Kraków 2001.

Integrated probe for multi-points simultaneous measurements of temperature and velocity gas flow fields

Abstract

This work presents an idea, design and model testing of an integrated probe for multi-points simultaneous measurements of temperature and velocity gas flow fields. The structure of this measurement device and its construction are discussed in details. Mobil measuring system based on presented probe is described. Next the results of model tests are shown. The range of potential applications of presented probe is also given.

Keywords: flow metrology, multi-points measurements, measuring probe

Recenzował: prof. dr hab. *Stanisław Gumuła*, Akademia Górniczo-Hutnicza