Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN
Tom 6, nr 3-4, (2004), s. 235-242
© Instytut Mechaniki Górotworu PAN

Charakterystyki metrologiczne cienkowarstwowych sensorów platynowych w zastosowaniu do wielopunktowych pomiarów pola prędkości przepływu

Paweł Ligęza, Elżbieta Poleszczyk

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

Streszczenie

W Pracowni Metrologii Przepływów powstaje termoanemometryczny system wielopunktowego pomiaru prędkości przepływu gazu, który znajdzie zastosowanie w warunkach kopalnianych.

Zastosowanie nowoczesnego układu pomiarowego oraz nowej, oryginalnej metody kompensacji temperatury pozwoli na skonstruowanie czujnika na bazie elementów platynowo-ceramicznych, charakteryzujących się właściwościami metrologicznymi zbliżonymi do czujników drutowych, wyróżniających się dużą odpornością mechaniczną i dobrą stabilnością charakterystyki. Nie bez znaczenia wydaje się fakt, że konstrukcja takich czujników będzie dużo prostsza i mniej czasochłonna.

W artykule przedstawiono przebieg i wyniki badań metrologicznych charakterystyk platynowo-ceramicznych sensorów cienkowarstwowych. Badania te miały na celu określenie właściwości metrologicznych tych czujników oraz sprawdzenie możliwości ich zastosowania w projektowanym układzie pomiarowym.

Słowa kluczowe: termoanemometria, sensory cienkowarstwowe, charakterystyki kątowe

1. Wprowadzenie

Pomiary prędkości przepływu gazów stanowią ważny element badania stanu i przebiegu procesu wentylacji kopalń. Dla zapewnienia efektywnego przewietrzania wyrobisk kopalnianych konieczne jest ciągłe monitorowanie wartości parametrów wentylacyjnych w wybranych punktach kopalni. Sprawność i niezawodność systemu pomiarowego sieci wentylacyjnej wpływa na przebieg procesu eksploatacji złoża i bezpieczeństwo pracy w kopalni. Ze względu na specyficzne warunki metrologiczne (przepływy nieizotermiczne, niestacjonarne, medium o wysokim stopniu zanieczyszczenia i wilgotności) opracowano dla potrzeb górnictwa szereg metod pomiaru prędkości przepływu gazu [1].

Typowym przyrządem stosowanym w górniczych pomiarach wentylacyjnych jest anemometr skrzydełkowy, który ze względu na znaczną stałą czasową nadaje się przede wszystkim do prowadzenia pomiarów statycznych. Pomiary dynamiczne anemometrem skrzydełkowym są z reguły obarczone dużym błędem. Do prowadzenia pomiarów zmiennych w czasie, badania stanów nieustalonych w sieciach wentylacyjnych i innych pomiarów dynamicznych stosowane są termoanemometry, które posiadają szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości, sięgające setek kiloherców. Miniaturowe rozmiary sondy pomiarowej dają możliwość pomiaru zbliżonego do punktowego oraz nieznacznie zaburzają pole prędkości i temperatury.

Do pomiarów nieizotermicznych, z jakimi mamy do czynienia w warunkach kopalnianych, termoanemometry wymagają zastosowania kompensacji temperaturowej. W Pracowni Metrologii Przepływów PAN opracowano nową metodę kompensacji temperaturowej [2], stanowiącą istotną modyfikację metody tradycyjnej. Metoda ta pozwala na uzyskanie lepszych parametrów metrologicznych układu pomiarowego, minimalizację statycznych i dynamicznych błędów pomiarowych oraz upraszcza technologię wytwarzania czujnika termoanemometrycznego.

Ze względu na specyficzne warunki przepływu w wyrobisku węglowym – wysoki poziom wilgotności oraz zanieczyszczenia medium w postaci pyłów o zróżnicowanym charakterze, koniecznym jest opracowanie

takiego czujnika pomiarowego, który odznaczałby się dużą odpornością mechaniczną i dobrą stabilnością charakterystyki pomiarowej w czasie. W typowych czujnikach termoanemometrycznych element mierzący prędkość i kompensujący wpływ temperatury stanowią cienkie metaliczne druty o grubości kilku mikrometrów, ulegające w warunkach odbiegających od laboratoryjnych uszkodzeniu oraz utlenieniu pod wpływem zanieczyszczeń i wilgoci. Aby chronić włókno pomiarowe przed destrukcją stosuje się specjalne osłony i filtry.

Projektowany termoanemometryczny układ pomiarowy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości jest oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury i pozwala na zastosowanie czujnika kompensacyjnego o praktycznie dowolnej rezystancji, w szczególnym przypadku identycznego z czujnikiem termoanemometrycznym. W efekcie pozwala to na stosowanie w układzie szerszej klasy czujników pomiarowych, co w wielu zagadnieniach metrologicznych umożliwia optymalizację procesu pomiarowego. Niewielka stała czasowa czujnika kompensacyjnego pozwala na uzyskanie szerokiego pasma przenoszonych częstotliwości fluktuacji temperatury, a w konsekwencji minimalizację błędów dynamicznych. Małe rozmiary włókna kompensacyjnego pozwalają na prowadzenie pomiarów punktowych, co jest szczególnie istotne w przepływach z dużym gradientem temperatury i umożliwia poprawną realizację algorytmu kompensacji temperaturowej termoanemometru.

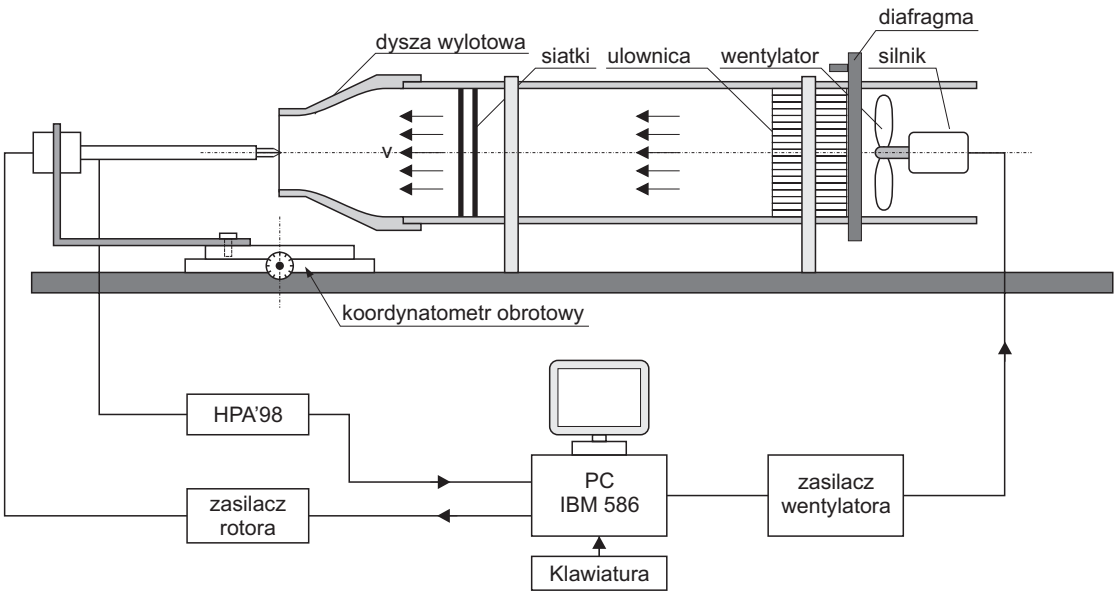
Ważnym aspektem modyfikacji dla tworzonego układu pomiarowego jest możliwość zastosowania identycznych czujników termoanemometrycznego i kompensacyjnego. Szczególnie w prostych systemach pomiarowych może to być istotne ze względów technologicznych i praktycznych oraz pozwolić na znaczne zwiększenie trwałości czujnika pomiarowego.

Autorzy proponują nowe rozwiązanie technologiczne, polegające na zastosowaniu 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 termoanemometrycznego przeznaczonego do pomiarów w warunkach kopalnianych – przy wysokim stopniu zapylenia, wilgotności, sturbulizowanym i nieizotermicznym charakterze płynącego medium.

Spełniają zatem wszelkie warunki do zastosowania w systemie pomiarowym, wytwarzanym do praktycznych zastosowań w pomiarach wentylacyjnych.

2. Badania charaktrystyk metrologicznych

Badania własności metrologicznych cienkowarstwowych sensorów platynowo-ceramicznych przeprowadzono na stanowisku badawczym, które skonstruowano w Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN [3]. Schemat stanowiska przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe

W skład stanowiska pomiarowego wchodzą:
- tunel aerodynamiczny;
- ulownica i system siatek wyrównujących przepływ (wyposażenie tunelu);
- wentylator z napędem;
- koordynatometr obrotowy, koordynatometr x-y;
- rotor sterowany komputerowo;
- bezmostkowy anemometr stałotemperaturowy HPA'98;
- komputer wyposażony w system akwizycji danych i program służący do ich przetwarzania oraz wizualizacji;
- zestaw testowych cienkowarstwowych sensorów platynowo-ceramicznych.

2.1. Tunel aerodynamiczny

Tunel aerodynamiczny został skonstruowany do różnorodnych badań parametrów metrologicznych systemów pomiarowych oraz czujników termoanemometrycznych.

Kanał przepływowy tunelu tworzy rura metapleksowa o średnicy 110 mm i długości ok. 1600 mm. Wewnątrz kanału zamontowano ulownicę, wykonaną w formie zwartego pakietu cienkich rurek metapleksowych i system odpowiednio dobranych siatek, które mają za zadanie wyrównanie przepływu. Wylot tunelu jest zaopatrzony w dyszę wylotową o średnicy około 70 mm. Tunel został wywzorcowany przy pomocy rurki spiętrzeniowej Pitota-Prandtla i metodą fal cieplnych w zakresie małych prędkości (0÷4 m/s). Uzyskano zależność prędkości przepływu powietrza od obrotów wentylatora. Przy pomocy precyzyjnego termoanemometru HPA'98 zbadano w kanale pomiarowym profile poprzeczne prędkości, aby stwierdzić, że w jego obszarze jest płaskie pole prędkości z niepewnością mniejszą niż 1%.

Urządzenie wytwarzające przepływ w tunelu zostało wykonane specjalnie do obsługi eksperymentów, które wymagają utrzymywania przez długi czas stabilnych parametrów przepływu. Napęd jest skonstruowany w oparciu o wentylator napędzany silnikiem trójfazowym. Silnik jest sterowany z falownika typu SJ100 007NFE firmy Hitachi. Realizuje on zasilanie wentylatora prądem zmiennym o częstotliwości 0.5÷50 Hz, co pozwala na uzyskanie prędkości obrotowej wentylatora od 30 do 3000 obrotów na minutę. Tak zbudowany napęd daje możliwość wytworzenia prędkości przepływu w zakresie od 0 do 35 m/s. Zamontowana w tunelu diafragma pozwala wytworzyć stabilny przepływ o prędkości w zakresie od 0 do 5 m/s. Czujnik pomiarowy umieszcza się u wylotu kanału przepływowego i jest on opływany przez strumień wydmuchiwany z tunelu.

Zmiany położenia osi sondy pomiarowej względem kierunku wektora prędkości przepływu, umożliwia zastosowanie rotora oraz układu koordynatometru obrotowego.

Obsadka czujnika umieszczona w uchwycie rotora może wykonywać obrót wokół swojej osi w pełnym kącie z niepewnością ok. 0.2°. Rotor wyposażony jest w pierścień służący do jego mocowania, silnik krokowy oraz zasilacz sterowany komputerowo, który pełni rolę sterownika obrotów sondy. Obrót czujnika wokół osi jest zadawany komputerowo z odpowiednim krokiem np. co 1°, 2° ,5°, ..., 10°.

2.2. Termoanemometr bezmostkowy HPA'98

W klasycznym mostkowym układzie stałotemperaturowym czujnik zasilany jest linią dwuprzewodową. Wadą tego rozwiązania jest wpływ zmian rezystancji doprowadzeń czujnika na pracę układu. Może to stanowić przyczynę błędów pomiarowych. Opracowany bezmostkowy, stałorezystancyjny układ zasilania czujnika z grzanym włóknem, z czteropunktowym pomiarem rezystancji, umożliwia eliminację tych błędów i precyzyjne utrzymywanie zadanego współczynnika nagrzania [4, 5]. Stosowanie tego układu jest zalecane w precyzyjnych pomiarach anemometrycznych, szczególnie w zakresie małych prędkości, przy małym współczynniku nagrzania, małej rezystancji elementu czynnego i długiej linii zasilającej czujnik. Układ umożliwia precyzyjną realizację następujących funkcji wybieranych przełącznikiem:
- pomiar rezystancji zimnego czujnika;
- nastawienie rezystancji nagrzanego czujnika;
- nastawienie wartości składowej stałej odejmowanej od sygnału wyjściowego;
- nastawienie wartości wzmocnienia sygnału wyjściowego;
- pracę w układzie stałotemperaturowym;
- przeprowadzenie testu częstotliwościowego i regulacji własności dynamicznych.

Do badań charakterystyk cienkowarstwowych sensorów platynowych została skonstruowana specjalna wersja stałorezystancyjnego termoanemometru bezmostkowego HPA'98. Koniecznym było przystosowanie układu elektronicznego do wysokiej rezystancji czujnika pomiarowego, która wynosi „na zimno" około 100 Ω, przy nagrzaniu jest jeszcze wyższa.

Zmodyfikowany termoanemometr bezmostkowy HPA'98 posiada następujące parametry techniczne:

- rezystancja pracy czujnika – do 200 Ω;
- rozdzielczość pomiaru rezystancji czujnika – 0.1 Ω;
- prąd czujnika – 0÷100 mA;
- napięcie wyjściowe – 0÷10 V;
- wzmocnienie wyjściowe – 0÷10×;
- filtr wyjściowy dolnoprzepustowy – 100 kHz.

Specjalistyczne oprogramowanie stanowiska pomiarowego umożliwia w pełni automatyczne wykonywanie charakterystyk dowolnych czujników termoanemometrycznych, uwzględniających zmiany orientacji elementów mierzących względem wektora prędkości przepływu. Pozwala również na zadawanie i utrzymywanie stabilnych warunków przepływu i pracy przyrządów pomiarowych.

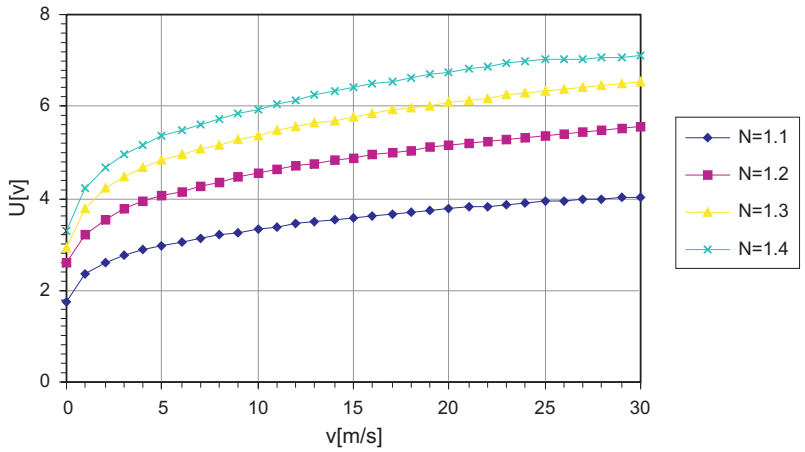
3. Charakterystyki cienkowarstwowych sensorów platynowo-ceramicznych

W celu wykonania charakterystyk $U(v)$ miniaturowych cienkowarstwowych sensorów platynowo-ceramicznych wykonano czujnik próbny. Element pomiarowy o rezystancji „na zimno" R_0 = 107.4 Ω, w kształcie prostokąta o wymiarach 2.66×1.55 mm i grubości 1.06 mm przylutowano za pomocą doprowadzeń o długości ok. 10 mm i grubości ok. 0.22 mm do płytki drukowanej wyposażonej w typowe złącze kontaktowe, osadzono w obsadce i podłączono do termoanemometru bezmostkowego HPA'98 z modyfikacją zakresu dopuszczalnej rezystancji czujnika do 200 Ω.

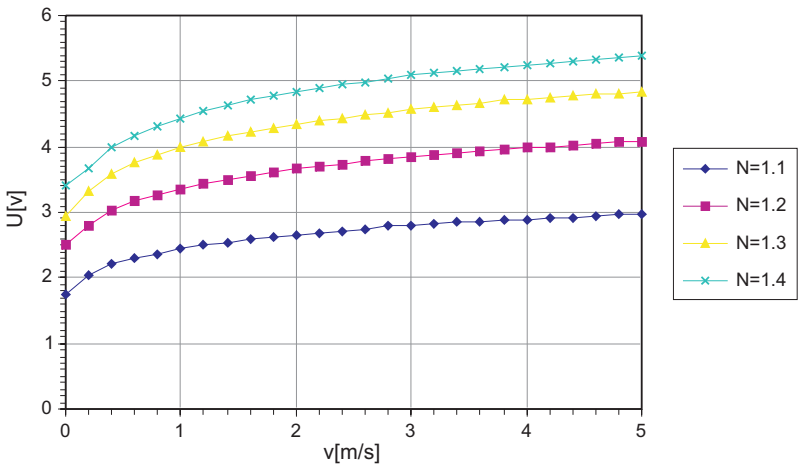
Badany czujnik został usytuowany płaską powierzchnią ceramiczną, prostopadle do przepływu, około 10 mm od krawędzi tunelu aerodynamicznego, w centralnym obszarze wylotu z kanału przepływowego (płaski profil prędkości). Charakterystyki wykonano w dwu zakresach prędkości: od 0 do 30 m/s (diafragma otwarta) oraz od 0 do 5 m/s (diafragma zamknięta). Rysunki 2 i 3 przedstawiają zestawienie charakterystyk przy różnych współczynnikach nagrzania w zakresie prędkości od 0 do 30 m/s i w zakresie małych prędkości od 0 do 5 m/s.

W pierwszym etapie badano charakterystyki czujnika przy różnych współczynnikach nagrzania: N = 1.1; 1.2; 1.3; 1.4, w ustawieniu prostopadłym powierzchnią ceramiczną do kierunku wektora prędkości przepływu.

Na podstawie przedstawionych wyżej zestawień charakterystyk można stwierdzić, że proponowany sensor, jako element mierzący w termoanemometrycznym systemie pomiaru pola prędkości może zastąpić



Rys. 2. Charakterystyki $U(v)$ platynowego sensora cienkowarstwowego w zakresie prędkości od 0 do 30 m/s, dla różnych współczynników nagrzania



Rys. 3. Charakterystyki $U(v)$ platynowego sensora cienkowarstwowego w zakresie prędkości od 0 do 5 m/s, dla różnych współczynników nagrzania

stosowane dotychczas cienkie, kilkumikronowe druty anemometryczne. Posiada zbliżone właściwości do czujników drutowych. Odznacza się wysoką czułością – może być stosowany przy małych prędkościach przepływu. Czujnik ma stosunkowo małe rozmiary, a więc spełnia wymóg pomiaru zbliżonego do punktowego, tym samym nie zaburza w znaczący sposób pola prędkości. Dodatkowo jego zaletą jest odporność mechaniczna i stabilność charakterystyki. Jedyną różnicę w stosunku do czujników drutowych stanowi wysokość przenoszonych częstotliwości – nie nadaje się do pomiarów bardzo szybkich fluktuacji przepływu.

3.1. Badania właściwości kierunkowych cienkowarstwowego sensora platynowo-ceramicznego

Aby stwierdzić, jaki wpływ na pomiar ma kąt ustawienia czujnika w stosunku do kierunku przepływu wykonano charakterystyki obrotowe próbnego sensora platynowego. Przy współczynniku nagrzania $N = 1.2$, $R_0 = 107.4\ \Omega$ oraz $R = 128.9\ \Omega$ zarejestrowano charakterystyki kątowe sensora w zakresie od 0 do 360°, przy prędkościach: 5, 10, 15, 20, 25, 30 m/s oraz w zakresie małych prędkości: 1, 2, 3, 4, 5 m/s.

Testowany czujnik umieszczono tak jak poprzednio, w centralnej części wylotu tunelu w odległości około 10 mm od krawędzi. Obsadkę czujnika zamontowano w gnieździe rotora, sterowanego komputerowo. Sygnał napięciowy był rejestrowany z krokiem 5° obrotu czujnika wokół osi własnej. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono charakterystyki kątowe cienkowarstwowego sensora platynowo-ceramicznego w dwu zakresach prędkości.

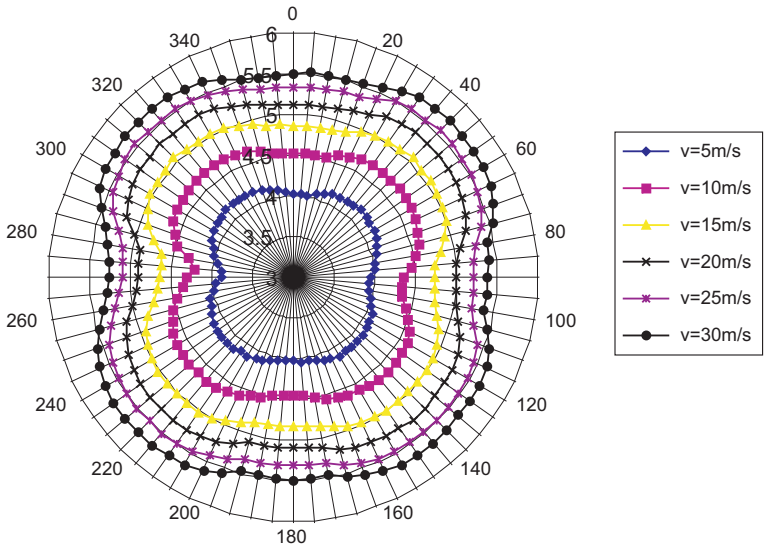
Na przedstawionych wykresach łatwo zauważyć, że najkorzystniejsze pomiarowo jest takie położenie sensora, niezależnie od wartości prędkości przepływu, kiedy jego płaska powierzchnia jest nachylona pod kątem 45° do kierunku przepływu.

Przy prostopadłości powierzchni wytwarza się prawdopodobnie strefa stagnacji, co praktycznie oznacza gorsze warunki opływu elementu grzanego przez medium, a więc niższy sygnał napięciowy.

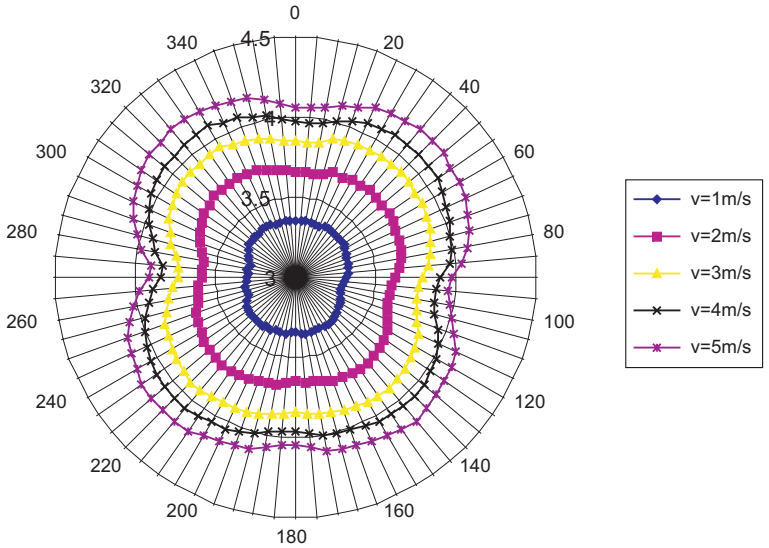
Przy kątach będących wielokrotnością 45° co 90° (np. 135°, 225°, 315°), kiedy czujnik nie jest prostopadły do przepływu powierzchnią ceramiczną ani krawędzią, medium równomiernie opływa element pomiarowy i warunki schładzania grzanego czujnika są optymalne. W przypadku takich ustawień sensora względem kierunku przepływu otrzymujemy maksymalny sygnał pomiarowy, co potwierdziły charakterystyki wykonane dla testowanego sensora w optymalnych położeniach względem kierunku przepływu, w pełnym zakresie prędkości.

Te obserwacje potwierdziły kolejne badania charakterystyk sensora wykonane w kolejnych optymalnych położeniach względem napływającego medium w obszarze kąta pełnego.

Na rysunkach 6 i 7 charakterystyki sensora w położeniach, które oznaczają nachylenie powierzchni sensora pod kątem 45° w stosunku do kierunku przepływu wykazują prawie idealną zgodność. Sensor ma postać małej dwustronnej płytki i okazuje się, że ustawiony którąkolwiek powierzchnią pod odpowiednim kątem do przepływu pozwala uzyskać prawie jednakowy sygnał napięciowy.



Rys. 4. Charakterystyki kątowe platynowego sensora cienkowarstwowego przy prędkości przepływu: 5, 10, 15, 20, 25, 30 m/s, dla współczynnika nagrzania $N = 1.2$

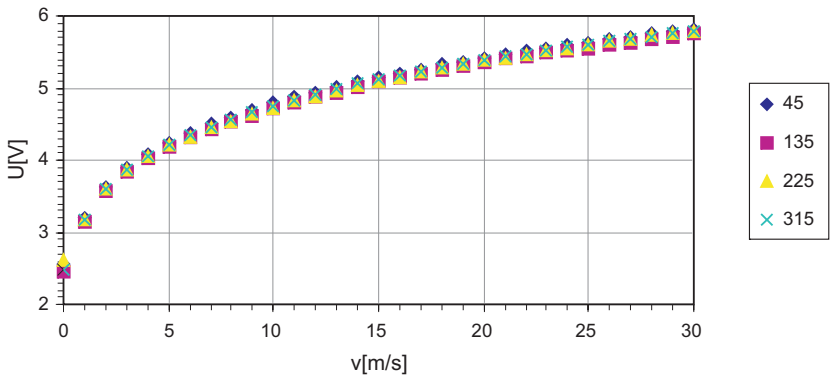


Rys. 5. Charakterystyki kątowe cienkowarstwowego sensora platynowo-ceramicznego przy prędkości przepływu: 1, 2, 3, 4, 5 m/s, dla współczynnika nagrzania $N = 1.2$

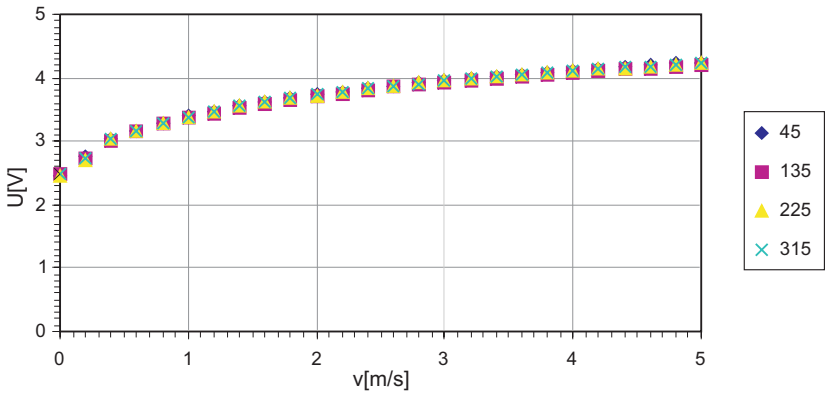
Rysunki 6 i 7 przedstawiają przykładowe charakterystyki zarejestrowane dla optymalnych położeń sensora, przy współczynniku nagrzania $N = 1.2$, w pełnym zakresie prędkości.

Wyniki wzorcowania cienkowarstwowych sensorów platynowych w postaci charakterystyk na rysunkach 6 i 7 został przeliczony i przedstawiony w układzie współrzędnych U^2 od $v^{0.5}$. W takim układzie współrzędnych charakterystyki linearyzują się zgodnie z prawem Kinga. Zlinearyzowane charakterystyki sensora przedstawiają rysunki 8 i 9.

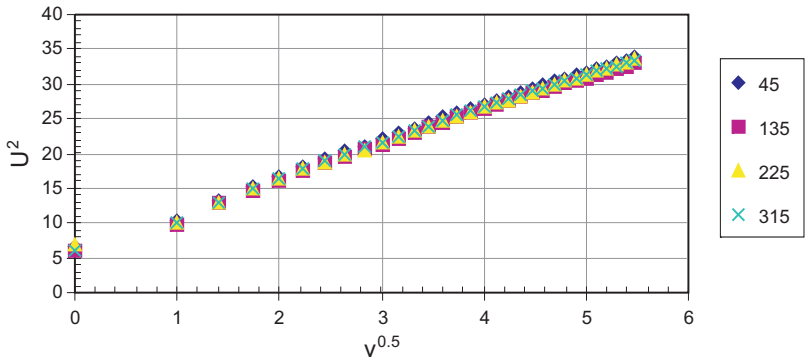
Zbadanie wpływu kąta ustawienia czujnika względem kierunku pozwoli odpowiednio zaprojektować docelową obudowę czujnika i ewentualne dodatkowe zabezpieczenia mechaniczne sensora, konieczne ze względu na specyfikę warunków pracy urządzenia w warunkach kopalnianych.



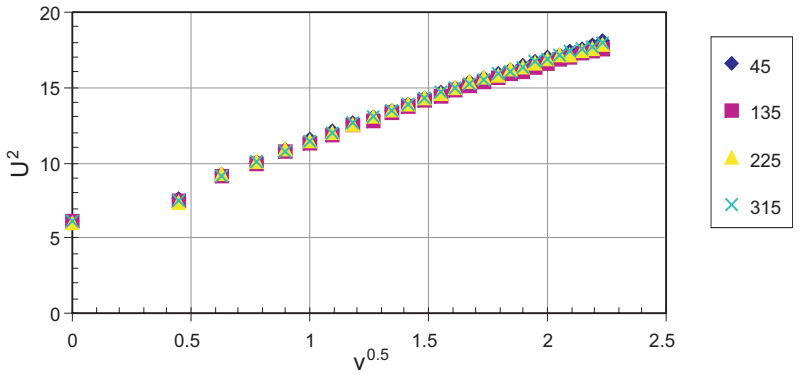
Rys. 6. Charakterystyki $U(v)$ cienkowarstwowego sensora platynowego w położeniach optymalnych w stosunku do kierunku przepływu, w zakresie prędkości od 0 do 30 m/s, $N = 1.2$



Rys. 7. Charakterystyki $U(v)$ cienkowarstwowego sensora platynowego w położeniach optymalnych w stosunku do kierunku przepływu, w zakresie prędkości od 0 do 5 m/s, $N = 1.2$



Rys. 8. Zlinearyzowane charakterystyki cienkowarstwowego sensora platynowego w położeniach optymalnych, w zakresie prędkości od 0 do 30 m/s, $N = 1.2$



Rys. 9. Zlinearyzowane charakterystyki cienkowarstwowego sensora platynowego w położeniach optymalnych, w zakresie prędkości od 0 do 5 m/s, $N = 1.2$.

3. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych prac mających na celu konstrukcję termoanemometrycznego systemu wielopunktowego pomiaru pola prędkości przebadano czujniki termoanemometryczne zbudowane z wykorzystaniem cienkowarstwowych sensorów platynowo-ceramicznych.

Ze względu na specyfikę pomiarów w warunkach kopalnianych poszukiwano elementu mierzącego, który mógłby zastąpić cienkie druty anemometryczne zachowując w wystarczającym stopniu właściwości czujników drutowych, równocześnie odznaczającego się odpornością mechaniczną i odpowiednią stabilnością charakterystyki. Takim elementem okazał się miniaturowy cienkowarstwowy sensor platynowo-ceramiczny.

Zbadano jego charakterystyki w dwu zakresach prędkości 0-30 m/s i 0-5 m/s, posługując się jako aparaturą pomiarową zmodyfikowaną wersją bezmostkowego termoanemometru stałotemperaturowego HPA'98.

Badania wykonano na specjalistycznym stanowisku pomiarowym, które pozwala automatycznie wytwarzać przepływ o kontrolowanych i stabilnych parametrach, rejestrację i przetwarzanie wyników pomiarów.

Cienkowarstwowy sensor platynowo-ceramiczny posiada właściwości zbliżone do cienkich metalicznych drutów anemometrycznych. Charakteryzuje się odpowiednią czułością w pełnym zakresie najczęściej mierzonych prędkości, równocześnie zachowując miniaturowe wymiary, które są gwarancją pomiaru zbliżonego do punktowego i nieinwazyjności. W przeciwieństwie do drutów anemometrycznych jest odporny mechanicznie.

Wykonanie wstępnych badań właściwości metrologicznych sensorów platynowych pozwoli w ostatecznej wersji układu pomiarowego zaprojektować w taki sposób konstrukcję sondy, by wykorzystany element czynny pracował w optymalnych warunkach.

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

Literatura

[1] Roszczynialski W., Trutwin W., Wacławik J.: *Kopalniane pomiary wentylacyjne*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1992.

[2] Ligęza P.: *A modified temperature-compensation circuit for CTA*, Measurement Science and Technology, 9, 1998.

[3] Poleszczyk E.: *Termoanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości*, (w:) Monografie Rozprawy, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, 2002.

[4] Ligęza P.: *High-precision CTA*, MTS News, 4, 1997

[5] Ligęza P.: *Thermoanemometric method for measuring velocity and temperature in non-isotermal flows*, Archives of Mining Sciences nr 3, 1994.

Hot-wire probe for multipoint flow velocity measurements

Abstract

Flow Metrology Laboratory develops a new hot-wire system to multipoint flow velocity measurements. Advanced measurement system and original method of temperature compensation enables applying sensor with platinum thin film deposited on ceramic support. This kind of sensor displays high mechanical resistance and stabile voltage-velocity characteristic.

In this article investigation of mentioned sensors were depicted.

Keywords: thermoanemometry, thin film, angular sensivity

Recenzował: Prof. dr hab. *Jan Kiełbasa*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN