

Właściwości cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych w aspekcie konstrukcji sondy do wyznaczania wektora prędkości przepływu w warunkach kopalnianych

PAWEŁ LIGĘZA, ELŻBIETA POLESZCZYK

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania laboratoryjne właściwości metrologicznych cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego. Zbadano w szerokim zakresie prędkości charakterystyki $U(v)$ oraz charakterystyki kąto-
we, przy różnych warunkach nagrzania elementu mierzącego.

Jak wykazały eksperymenty, w dotychczas stosowanych termooanemometrycznych czujnikach trójwłóknowych do wyznaczania wektora prędkości przepływu można zastąpić cienki grzany drut metaliczny cylindrycznym sensorem platynowo-ceramicznym.

Sonda trzejelementowa zbudowana na bazie badanych elementów pomiarowych będzie połączona z potrójną głowicą termooanemometryczną, której praktyczną przydatność w warunkach kopalnianych potwierdziły badania in situ prowadzone w celu weryfikacji numerycznej symulacji przepływu w wyrobisku.

Przedstawiono również wstępny projekt konstrukcji sondy do wyznaczania składowych wektora prędkości w wyrobisku górnym.

Słowa kluczowe: termooanemometria, cylindryczny sensor platynowo-ceramiczny, głowica zintegrowana, składowe wektora prędkości przepływu

1. Wprowadzenie

W Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN skonstruowano termooanemometryczny system pomiarowy, który został praktycznie zastosowany do pomiaru profilu prędkości w wybranym przekroju wyrobiska górnego i badania warstwy przyściennej.

Termooanemometryczny system pomiarowy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości i temperatury [1] jest oparty na czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Matryca takich czujników tzw. głowic zintegrowanych, rozmieszczonych w badanym przekroju wyrobiska współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych. Rozmieszczenie sond pomiarowych w wybranych punktach badanego pola prędkości, a następnie rejestracja i przetwarzanie sygnałów z poszczególnych sond umożliwiają współczesowy pomiar pola temperatury i prędkości oraz intensywności turbulencji, a także wyznaczenie strumienia objętościowego.

Zasadniczy element w torze pomiarowym układu stanowią cienkowarstwowe sensory platynowo-ceramiczne o kształcie cienkiej płytki, które, jak wykazały badania laboratoryjne [2] posiadają właściwości metrologiczne zbliżone do tradycyjnych włókien anemometrycznych: umożliwiają punktowy pomiar prędkości, powodują tylko nieznaczne zaburzenie pola prędkości, wykazują dużą czułość, przenoszą częstotliwości w zakresie do kilkudziesięciu Hz oraz posiadają bardzo dobrą stabilność czasową i temperaturową. Natomiast wyróżniają się dużą odpornością mechaniczną, co jest bardzo istotne przy zastosowaniu aparatury pomiarowej w specyficznych warunkach kopalnianych. Jedynie w przypadku badań szybkich fluktuacji przepływu elementy te zostają zastąpione cienkimi drutami metalicznymi.

W niektórych zagadnieniach metrologicznych badań przepływu w wyrobiskach bardzo przydatnym może okazać się wyznaczenie wektora prędkości przepływu, a więc jego poszczególnych składowych (v_x , v_y , v_z) oraz wartości modułu wektora.

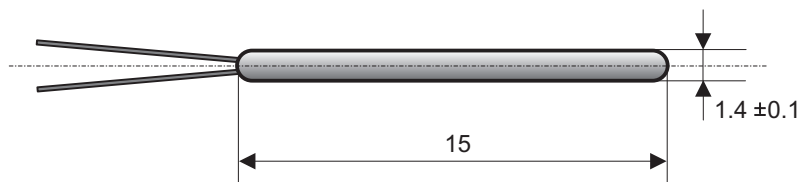
Płytkowe sensory platynowo-ceramiczne umożliwiły pomiar dwukierunkowy. Dzięki zastosowaniu tych elementów skonstruowano sondy pojedyncze oraz podwójne, pozwalające na detekcję zwrotu wektora prędkości. Głowice zintegrowane do wyznaczania zwrotu wektora prędkości przepływu składają się z dwóch jednakowych układów anemometrycznych tworzących konstrukcyjnie całość z zasadniczym dwuelementowym czujnikiem.

Termoanemometryczna głowica zintegrowana do wyznaczania wektora prędkości jest rozwinięciem poprzedniej koncepcji. W najnowszym rozwiązaniu zostaną wykorzystane cylindryczne sensory platynowo-ceramiczne, których właściwości metrologiczne pozwalają na pomiary w przepływach w szerokim zakresie obejmującym bardzo małe prędkości. Opracowanie nowego narzędzia do wyznaczania wektora prędkości w warunkach przemysłowych poszerzy znacząco obszar aplikacyjny aparatury termoanemometrycznej.

2. Element pomiarowy

W nowym rozwiązaniu konstrukcyjnym potrójnej zintegrowanej głowicy termoanemometrycznej do wyznaczania wektora prędkości przepływu pierwszym elementem w torze pomiarowym jest czujnik będący układem trzech cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych, które tworzą w przestrzeni naroże sześcianu. Konfiguracja przestrzenna tej sondy jest analogiczna do potrójnego czujnika drutowego, którego badaniom i metodzie wyznaczania składowych wektora prędkości poświęcono w poprzednich latach kilka obszernych prac [3].

W miejsce stosowanych zwykle cienkich drutów wolframowych zastosowano miniaturowe temperaturowe sensory platynowo-ceramiczne w kształcie cienkich, cylindrycznych pręcików. Rys. 1. przedstawia szkic takiego elementu.



Rys. 1. Szkic miniaturowego cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego

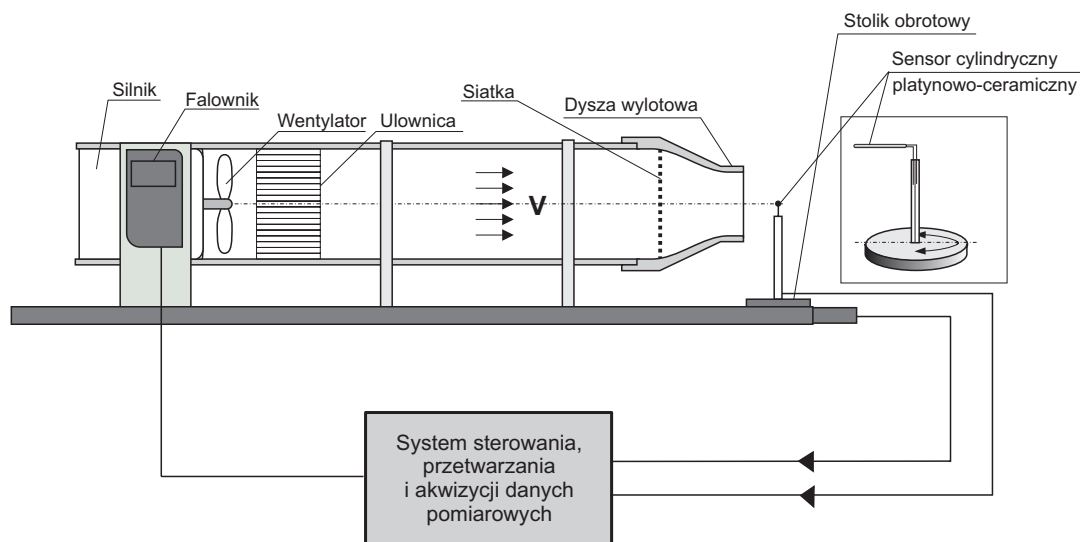
Cylindryczny sensor platynowo-ceramiczny zbudowany jest z cylindra wykonanego z tlenku aluminium, wewnątrz którego umieszcza się spiralę z cienkiego drutu platynowego, którego końce są wyprowadzone na zewnątrz zasklepionego obustronnie korpusu czujnika. Wyprowadzone końcówki są platynowo lub palladowo-złote, dzięki czemu łatwo można je łączyć ze zwykłymi przewodami za pomocą lutowania. Sensory tej klasy są produkowane przez międzynarodową firmę Heraeus. Długość sensora wynosi 15 mm, natomiast średnica 1.4 mm. Zastosowana obudowa z tlenku aluminium jest przewidziana do pracy w temperaturach od -200° do $+600^{\circ}\text{C}$. Wytrzymałość elementu na uderzenia i wibracje jest ograniczona.

3. Badanie właściwości metrologicznych

Badania właściwości metrologicznych miniaturowych cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych przeprowadzono na stanowisku badawczym, które skonstruowano w Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN. Schemat stanowiska przedstawia rys. 2.

Tunel aerodynamiczny przedstawiony na rysunku został skonstruowany do badań charakterystyk kierunkowych czujników prędkości w zakresie małych i średnich prędkości, tj. do 17 m/s. Wymiary geometryczne tunelu wynoszą odpowiednio: długość 1500 mm, średnica dyszy wylotowej 110 mm.

W skład stanowiska wchodzi: otwarty tunel aerodynamiczny z wentylatorem napędzanym silnikiem trójfazowym zasilanym prądem o częstotliwości w zakresie od 0,5 do 50 Hz z rozdzielczością 0,1 Hz z fa-



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego

lownika HITACHI SJ200. Integralne części stanowiska stanowią: termooanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stałotemperaturowego, stół z silnikiem krokowym do regulacji położenia czujnika pomiarowego, system pomiarowy zbudowany na bazie wielofunkcyjnej karty do akwizycji danych NI USB-6009. Całość nadzorowana jest przez program kontrolno pomiarowy wykonany w środowisku DELPHI, za pomocą którego dokonywane jest sterowanie układem oraz akwizycja i wizualizacja danych pomiarowych. Specjalistyczne oprogramowanie umożliwia:

- zadawanie prędkości przepływu – sterowanie falownikiem,
- regulacja kątem obrotu czujnika,
- sterowanie wielofunkcyjną kartą pomiarową NI USB 6009: akwizycja danych pomiarowych – wejścia analogowe, sterowanie układem termooanemometrycznym – wyjścia cyfrowe),
- sterowanie termooanemometrycznym systemem pomiarowym (zadawanie poziomu nagrzania czujnika oraz pomiar rezystancji czujnika w kanałach 1-4, wybór trybu pracy torów pomiarowych – stałoprądowy termometr rezystancyjny lub termooanemometr stałotemperaturowy),
- zapisywanie oraz wizualizacja danych pomiarowych.

3.1. Termooanemometr bezmostkowy HPA'98

Do badań charakterystyk cylindrycznych sensorów platynowych została wykorzystana specjalna wersja stałotemperaturowego termooanemometru bezmostkowego HPA'98. Koniecznym było przystosowanie układu elektronicznego do wysokiej rezystancji czujnika pomiarowego, która wynosi „na zimno” około 100 Ω po nagrzaniu jest jeszcze wyższa.

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, stałotemperaturowy układ zasilania czujnika z grzonym 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 współczynnikiem 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.

Zmodyfikowany termooanemometr bezmostkowy HPA'98 posiada następujące parametry techniczne:

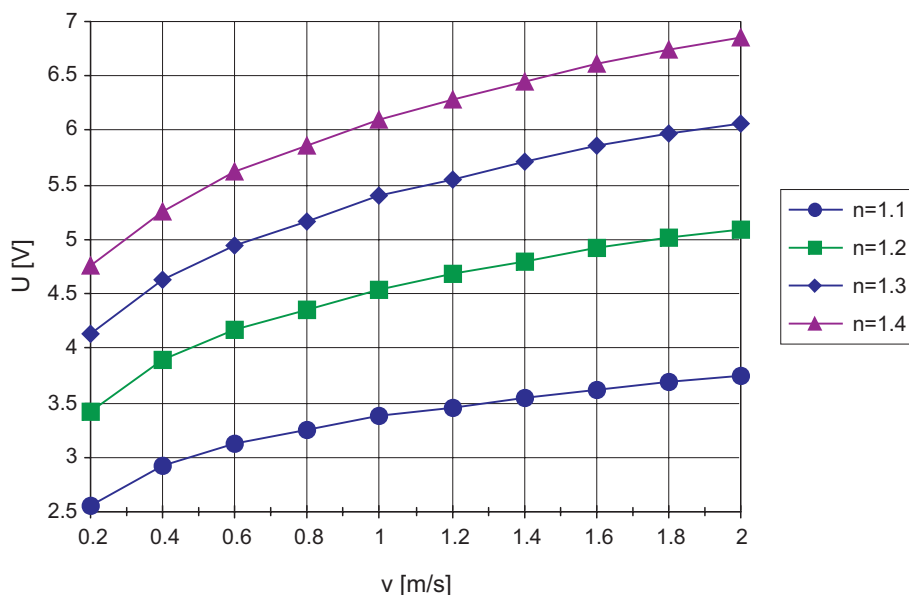
- rezystancja czujnika – do 200 Ω
- rozdzielczość pomiaru rezystancji czujnika – 0.1 Ω ,
- prąd czujnika – 0÷100 mA,
- napięcie wyjściowe – 0÷10 V,
- wzmacnienie wyjściowe – 0÷10 \times ,
- filtr wyjściowy dolnoprzepustowy – 100 kHz.

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

3.2. Badanie charakterystyk $U(v)$ sensora cylindrycznego

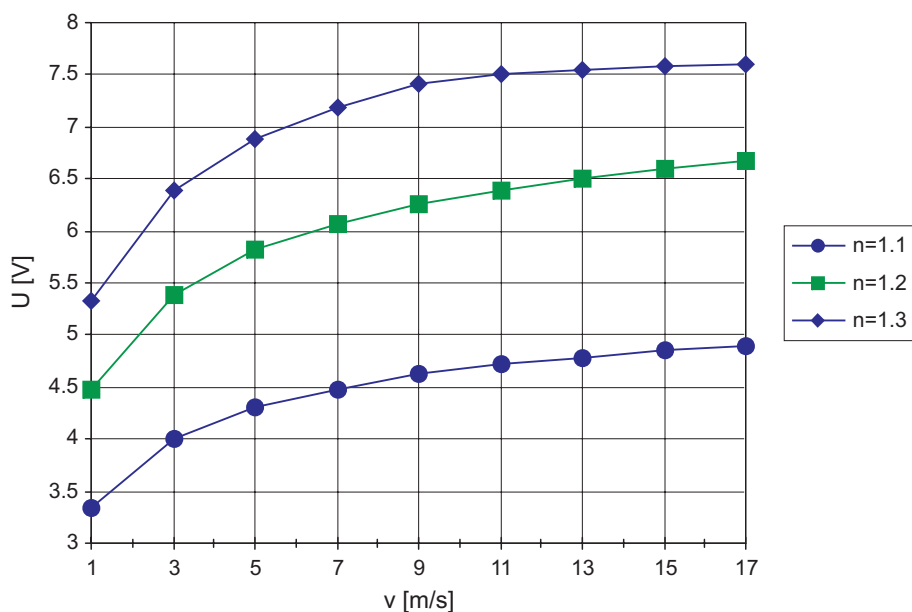
W celu wykonania charakterystyk $U(v)$ miniaturowych cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych wykonano czujnik próbny. Element pomiarowy o rezystancji „na zimno” $R_0 = 108.7 \Omega$, w kształcie zasklepionego obustronnie walca lub pręcika o przekroju kołowym o wymiarach $l = 15\text{mm}$, $\phi = 0.4 \text{ mm}$ przylutowano za pomocą doprowadzeń o długości ok. 10 mm i grubości ok. 0.2 mm do płytki drukowanej wyposażonej w typowe złącze kontaktowe, osadzono w obsadce i podłączono do termooanemometru bezmostkowego HPA'98 z modyfikacją zakresu dopuszczalnej rezystancji czujnika do 200 Ω .

Badany czujnik został usytuowany tak, by jego podłużna oś symetrii była usytuowana poziomo i prostopadle do kierunku napływającego powietrza, około 10 mm od krawędzi tunelu aerodynamicznego, w centralnym obszarze wylotu z kanału przepływowego (płaski profil prędkości). Charakterystyki wykonano w dwu zakresach prędkości: od 0.2 do 2 m/s co 0.2 m/s oraz od 1 do 17 m/s co 2 m/s. Rysunki 3 i 4 przedstawiają zestawienie charakterystyk przy różnych współczynnikach nagrzania w obu zakresach. Współczynnik nagrzania przyjmował kolejno wartości 1.1, 1.2, 1.3, 1.4.



Rys. 3. Charakterystyki $U(v)$ cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego w zakresie małych prędkości 0.2÷2 m/s przy współczynnikach nagrzania $N = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$

Na Rys. 3. przedstawiono charakterystyki $U(v)$ wykonane przy różnych współczynnikach nagrzania elementu mierzącego w zakresie małych prędkości od 0.2 do 2 m/s. Jak widać czujnik posiada odpowiednią czułość do zastosowania w pomiarach bardzo wolnych przepływów.



Rys. 4. Charakterystyki $U(v)$ cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego w pełnym zakresie prędkości 1÷17 m/s przy współczynnikach nagrzania $N = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$

W zakresie wyższych prędkości przepływu przedstawiono charakterystyki (Rys. 4.) przy współczynniku nagrzania 1.1, 1.2, 1.3. Można zauważyć, że już przy współczynniku $N = 1.3$ dla prędkości powyżej 9 m/s następuje spłaszczenie charakterystyki. Nagrzanie stosunkowo dużego elementu mierzącego wymagałoby większego zasilania. W zaprojektowanym systemie przyjęto jako stały współczynnik nagrzania równy 1.2.

Na podstawie przedstawionych wyżej zestawień charakterystyk można stwierdzić, że proponowany sensor, jako element tworzący bazę pomiarową w termoanemometrycznym systemie wyznaczania składowych wektora prędkości może zastąpić stosowane dotychczas cienkie druty anemometryczne.

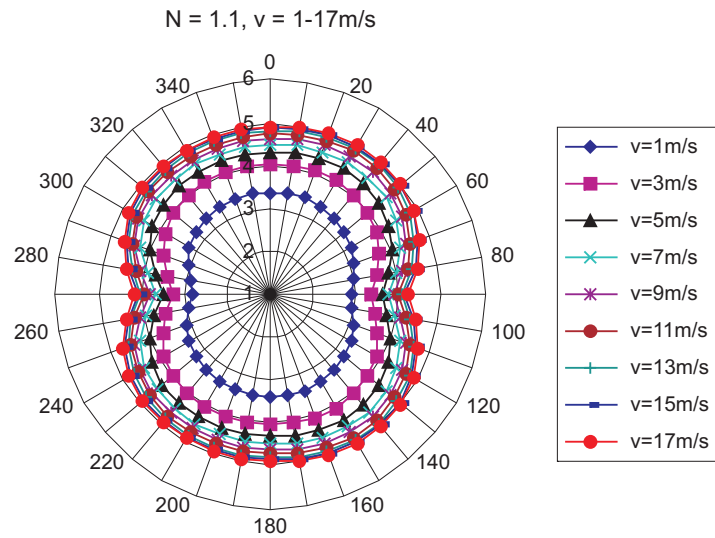
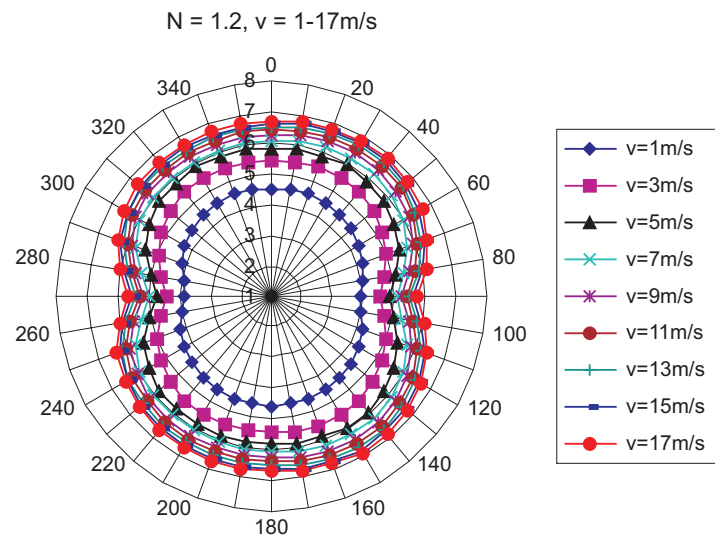
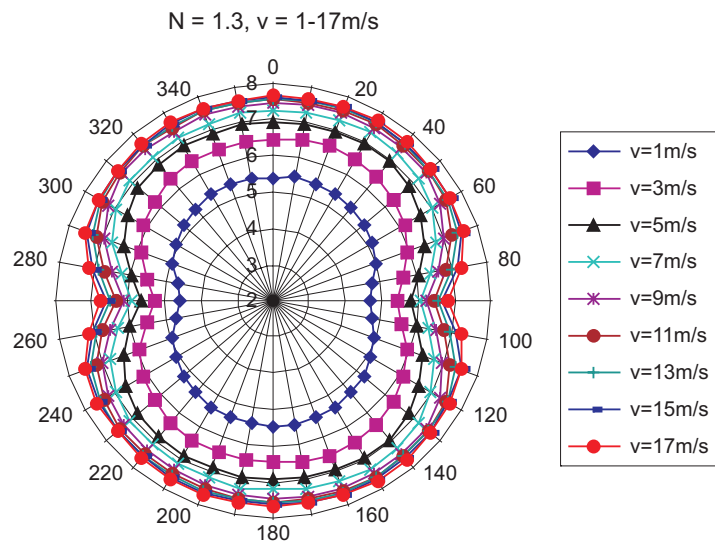
Badany sensor odznacza się wysoką czułością – szczególnie może być stosowany przy małych prędkościach przepływu. Izolowany ceramiczną obudową element mierzący, charakteryzujący się dużą odpornością na czynniki zewnętrzne (zanieczyszczenia, wilgoć) oraz stabilnością czasową i temperaturową charakterystyki, będzie szczególnie dobrze sprawdzał się w długotrwałych pracach pomiarowych prowadzonych w trudnych warunkach przemysłowych. Jediną różnicę w stosunku do czujników drutowych stanowi wysokość przenoszonych częstotliwości – nie nadaje się do pomiarów szybkiej fluktuacji przepływu.

3.3. Badania właściwości kierunkowych cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego

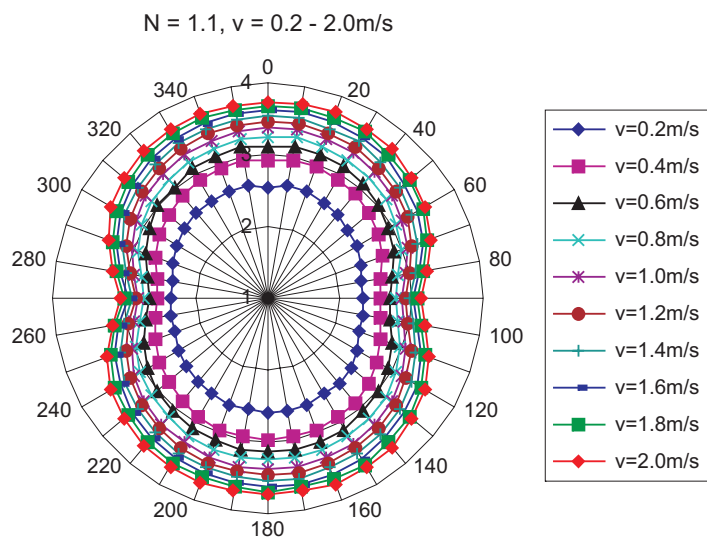
Aby stwierdzić, jaki wpływ na uzyskany sygnał napięciowy ma kąt ustawienia czujnika w stosunku do kierunku przepływu wykonano charakterystyki obrotowe cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego. Przy różnych współczynnikach nagrzania $N = 1.1, 1.2, 1.3$, $R_0 = 108.7 \Omega$ zarejestrowano charakterystyki kątowe sensora w zakresie kątów od 0 do 360°, przy prędkościach z zakresu 1÷17 m/s co 2 m/s oraz przy współczynnikach nagrzania $N = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$ w zakresie małych prędkości 0.2÷2 m/s co 0.2 m/s.

Testowany sensor umieszczono tak jak poprzednio – oś podłużna sensora była pozioma i prostopadła do kierunku przepływu, 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 10° obrotu czujnika wokół osi poprzecznej. Na rysunkach 5, 6, 7 przedstawiono charakterystyki kątowe cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego w pełnym zakresie prędkości do 17 m/s, przy różnych współczynnikach nagrzania.

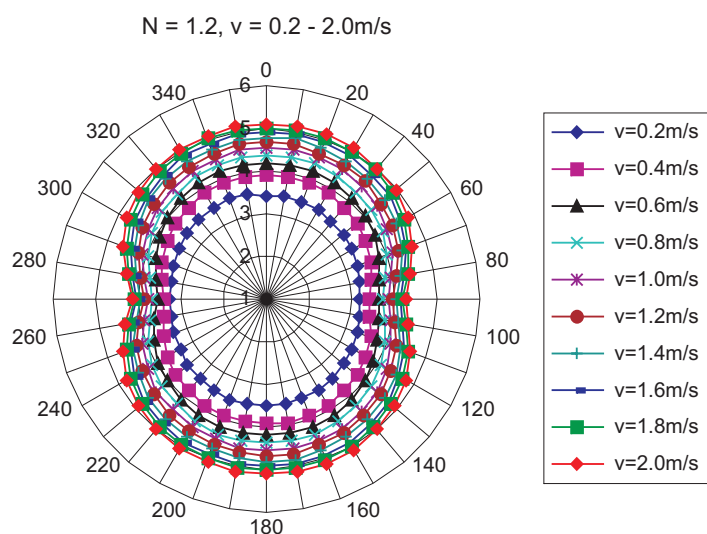
W położeniu wyjściowym – kąt 0° – oś podłużna cylindra jest prostopadła do przepływu. W ustawieniu względem napływającego powietrza odpowiadającym kątom $0^\circ \pm 180^\circ$ otrzymujemy najwyższy sygnał napięciowy. Natomiast w ustawieniach $90^\circ \pm 180^\circ$, czyli wtedy gdy oś podłużna walca jest zgodna z kierunkiem przepływu sygnał jest mniejszy. Kształt i budowa sensora sprawiają, że warunki opływu powierzchni przez

Rys. 5. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości $1\div 17\text{ m/s}$, $N = 1.1$ Rys. 6. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości $1\div 17\text{ m/s}$, $N = 1.2$ Rys. 7. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości $1\div 17\text{ m/s}$, $N = 1.3$

strugę są korzystne i uzyskujemy dobry sygnał napięciowy w szerokim obszarze kąta napływu medium na pobocznice sensora. Kolejne rysunki 8, 9, 10, 11 przedstawiają charakterystyki kątowe sensora cylindrycznego w zakresie małych prędkości $0.2 \div 2$ m/s co 0.2 m/s w analogicznych warunkach ustawienia położenia i poziomu nagrzania.

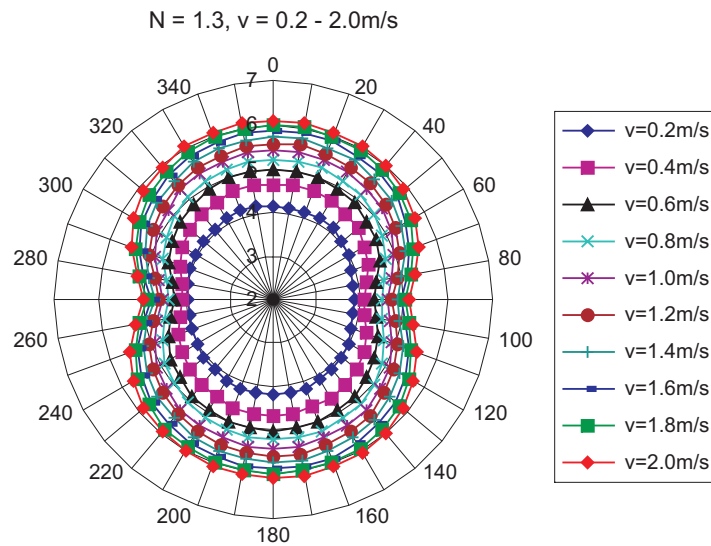
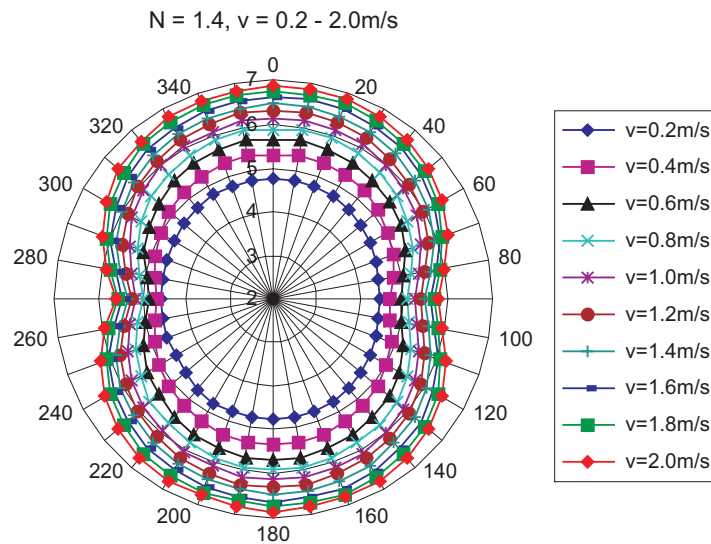
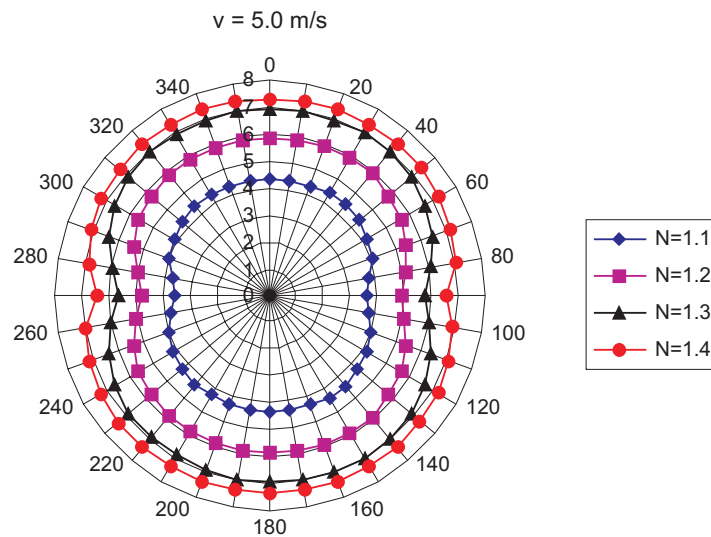


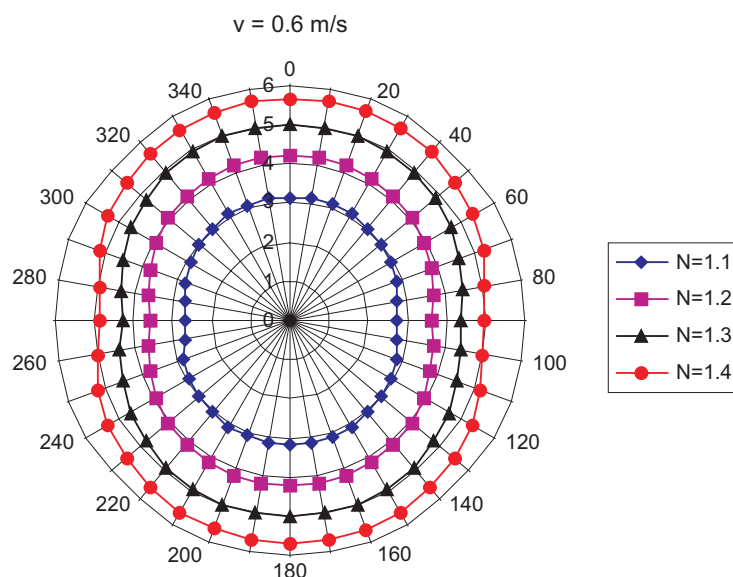
Rys. 8. Charakterystyka kąтовая, zakres prędkości $0.2 \div 2$ m/s, $N = 1.1$



Rys. 9. Charakterystyka kąтовая, zakres prędkości $0.2 \div 2$ m/s, $N = 1.2$

Przedstawione powyżej wykresy potwierdzają wyjątkowe właściwości metrologiczne badanego sensora, umożliwiające jego stosowanie szczególnie do pomiarów bardzo wolnych przepływów przy różnych współczynnikach nagrzania i szerokim zakresie kąta ustawienia osi podłużnej względem kierunku przepływu. Sensor odznacza się dużą czułością i stabilnością charakterystyki. Dzięki swojemu cylindrycznemu kształtowi sensor ma idealnie symetryczną charakterystykę. Na kolejnych dwóch wykresach (Rys. 12. i Rys. 13) zamieszczono zestawienie charakterystyk kątowych sensora przy wybranej prędkości, w zmieniających się warunkach nagrzania.

Rys. 10. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości $0 \div 2 \text{ m/s}$, $N = 1.3$ Rys. 11. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości $0 \div 2 \text{ m/s}$, $N = 1.4$ Rys. 12. Charakterystyka kątowna, prędkość $v = 5 \text{ m/s}$, $N = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$

Rys. 13. Charakterystyka kątowna, prędkość $v = 0.6$ m/s, $N = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$

4. Podsumowanie

W ramach prac badawczych mających na celu konstrukcję termooanemometrycznego systemu wyznaczenia składowych wektora prędkości przepływu do zastosowania w warunkach przemysłowych przebadano czujniki termooanemometryczne zbudowane z wykorzystaniem miniaturowych cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych.

Ze względu na specyfikę pomiarów np. 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 czasową i temperaturową charakterystyki. Takim elementem okazał się miniaturowy cylindryczny sensor platynowo-ceramiczny.

Szczegółowe badania laboratoryjne wykazały, że cylindryczny sensor platynowo-ceramiczny posiada wyjątkowo korzystne właściwości metrologiczne i ze względu na odpowiedni kształt stwarza możliwość wbudowania go, jako części konstrukcyjnej wieloelementowej sondy do wyznaczenia składowych wektora prędkości przepływu.

Przedstawione charakterystyki $U(v)$ wskazują na poziom czułości elementu mierzącego wystarczający do przewidzianych zastosowań. Szczególnym i wartym podkreślenia jest fakt dużej czułości cylindrycznego sensora w zakresie bardzo wolnych przepływów do 2 m/s. Badania właściwości kierunkowych czujnika wykazały, że w całym zakresie kąta pełnego posiada charakterystykę kątową i wysoki poziom rejestrowanego sygnału napięciowego. Dzięki symetrycznemu i opływowemu kształtowi czujnika uzyskujemy w trakcie obrotu w przepływie symetryczną charakterystykę kątową badanego elementu.

Budowa czujnika gwarantuje odporność mechaniczną na zanieczyszczenie medium oraz wilgoć, a nawet krople wody, które mogą znaleźć się w płynącym medium. Potrójna sonda zbudowana na bazie sensorów platynowo-ceramicznych nie stwarza konieczności stosowania osłon i filtrów ale wymaga od potencjalnego użytkownika ostrożności i odpowiednich warunków przechowywania ze względu na przestrzenną budowę i ceramiczny materiał, który osłania metaliczne elementy sensora.

Zaprojektowano i wykonano unikatową prototypową potrójną sondę do wyznaczenia składowych wektora prędkości zintegrowaną z wieloukładową głowicą termooanemometryczną. Szczegółowy opis skonstruowanej sondy będącej częścią hybrydowego termooanemometrycznego systemu wyznaczenia składowych wektora prędkości w warunkach przemysłowych w tym kopalnianych oraz wyniki badań laboratoryjnych autorzy przedstawiają w kolejnej publikacji.

Literatura

- [1] Ligęza P., Poleszczyk E.: *Multi-points measurements of gas flow velocity fields*, Archiwum Górnictwa, Vol. 4, 2005.
- [2] Ligęza P., Poleszczyk E.: *Charakterystyki metrologiczne cienkowarstwowych sensorów platynowych w zastosowaniu do wielopunktowych pomiarów pola prędkości przepływu*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2004.
- [3] Poleszczyk E.: *Termoanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości*, Monografie Rozprawy, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2002.
- [4] Ligęza P.: *High-precision CTA*, MTS News, 4, 1997.
- [5] Ligęza P.: *Thermoanemometric method for measuring velocity and temperature in non-isothermal flows*, Archives of Mining Sciences nr, 3, 1994.

Properties of cylindrical platinum-ceramic sensor as a elements of probe for flow velocity vector components measurement in mine working

Abstract

This article presents results of laboratory investigations of the cylindrical platinum-ceramic sensor. The relationship $U(v)$ in wide range of flow velocity and angular response for manifold overheat ratio of the sensors were searched. As was shown thin wires in triple wire anemometers probe may be replaced by cylindrical platinum-ceramic sensor. A tentative design of probe for flow velocity vector components measurement in mine working was presented.

Keywords: thermal anemometry, integrated head, cylindrical platinum-ceramic sensor, flow velocity vector componets

Recenzował: Prof. dr hab. inż. *Stanisław Wasilewski*, AGH, Kraków