

Zastosowanie termooanemometrycznej metody pomiaru prędkości przepływu powietrza w górnictwie głębinowym

Część 2 – Badania eksperymentalne sensora

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY^{ID}, ELŻBIETA POLESZCZYK^{ID}, PAWEŁ LIGĘZA^{ID}

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

Streszczenie

Analiza i pomiary sieci wentylacyjnej stanowią ważny element badania stanu i przebiegu procesu wentylacji kopalń. Sprawność i niezawodność systemu sieci wentylacyjnej wpływa na przebieg procesu eksploatacji i bezpieczeństwa pracy w kopalni. W artykule przedstawiono koncepcję i prototyp termooanemometrycznego systemu pomiarowego do wielopunktowych pomiarów pola prędkości. System oparty jest 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 symultaniczny, wielopunktowy pomiar prędkości przepływu w badanym przekroju. W czujnikach zastosowano oryginalny układ pomiarowy oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury. Układ ten jest przedmiotem patentu autorów. Opracowany system pomiarowy posłużył do weryfikacji komputerowych symulacji przepływów powietrza w wybranych rejonach wyrobisk górniczych. W tej części cyklu publikacji przedstawiono wyniki badań sensora, stanowiący główny element konstrukcji czujników.

Słowa kluczowe: Wentylacja kopalń; pomiary sieci wentylacyjnych; systemy pomiarowe; termooanemometria; kompensacja temperaturowa; symulacje komputerowe

1. Wprowadzenie

Analiza i pomiary sieci wentylacyjnej stanowią ważny element badania stanu i przebiegu procesu wentylacji kopalń. Sprawność i niezawodność systemu sieci wentylacyjnej wpływa na przebieg procesu eksploatacji i bezpieczeństwa pracy w kopalni [1].

Do prowadzenia badań stanów nieustalonych w sieciach wentylacyjnych i innych pomiarów dynamicznych stosowane są termooanemometry, które posiadają szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości, sięgające setek kiloherców. Autorzy projektu proponują eksperymentalną weryfikację numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku górniczym z zastosowaniem termooanemometrycznego systemu wielopunktowego pomiaru pola prędkości, przystosowanego do specyficznych warunków pracy w kopalni, takich jak przepływ nieustalony i nieizotermiczny o znacznym zanieczyszczeniu i wilgotności. Prototypowe czujniki pomiarowe i koncepcja tego systemu została opracowana i przebadana eksperymentalnie w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN.

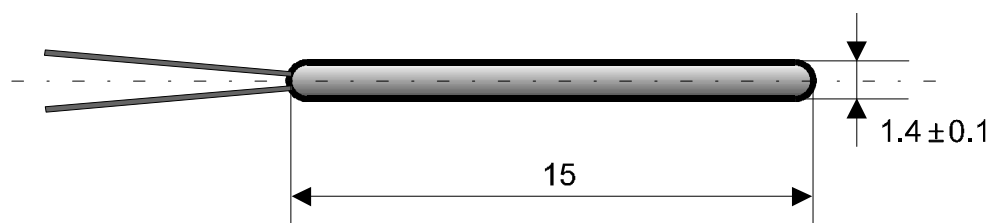
Termooanemometryczny system pomiarowy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości jest oparty na czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Matryca takich czujników rozmieszczonych w badanym przekroju wyrobiska współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych. Umożliwia to symultaniczny, wielopunktowy pomiar prędkości przepływu w badanym przekroju. W czujnikach zastosowano oryginalny układ pomiarowy oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury. Układ ten jest przedmiotem patentu autorów. 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 wyrobiska górniczego. 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.

2. Podstawowy element pomiarowy czujnika pomiarowego

W nowym rozwiązaniu konstrukcyjnym potrójnej zintegrowanej głowicy termooanemometrycznej do wyznaczenia 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 wyznaczenia składowych wektora prędkości poświęcono w poprzednich latach kilka obszernych prac [6].

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

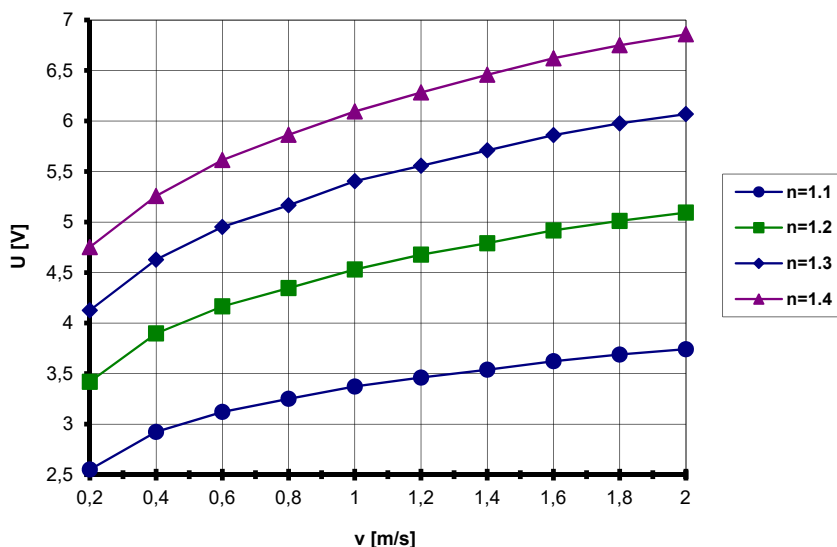
Cylindryczny sensor platynowo-ceramiczny zbudowany jest z cylindra wykonanego z tlenku aluminium, wewnątrz którego umieszcza się spiralę z cienkiego drutu platynowego, którego końce są wyprowadzone na zewnątrz zasklepionego obustronnie korpusu czujnika. Wyprowadzone końcówki są platynowo lub palladowo-złote, 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°C do $+600^{\circ}\text{C}$. Wytrzymałość elementu na uderzenia i wibracje jest ograniczona.

3. Badania właściwości metrologicznych sensora dla różnych współczynników nagrzania

Badania laboratoryjne sensora objęły charakterystyki $U(v)$ oraz charakterystyki kątowe, przy różnych warunkach nagrzania i zakresach prędkości. 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 .

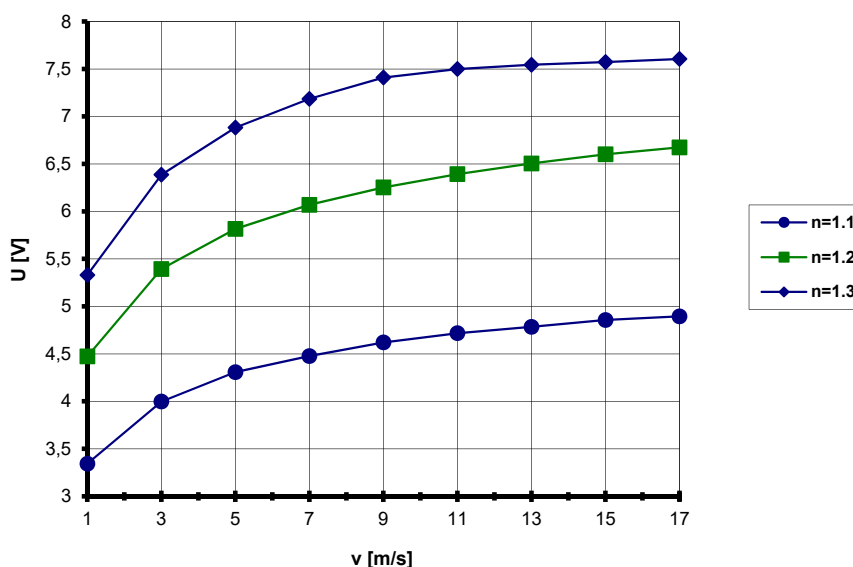
Badany czujnik został usytuowany tak, by jego podłużna oś symetrii była usytuowana poziomo i prostopadle do kierunku napływającego powietrza, około 10 mm od krawędzi tunelu aerodynamicznego, w centralnym obszarze wylotu z kanału przepływowego (płaski profil prędkości). Charakterystyki wykonano w dwu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

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

W zakresie wyższych prędkości przepływu przedstawiono charakterystyki Rys. 3. 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 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.



Rys. 3. Charakterystyki $U(v)$ cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego w pełnym zakresie prędkości 1÷17 m/s przy współczynnikach nagrzania $N = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$

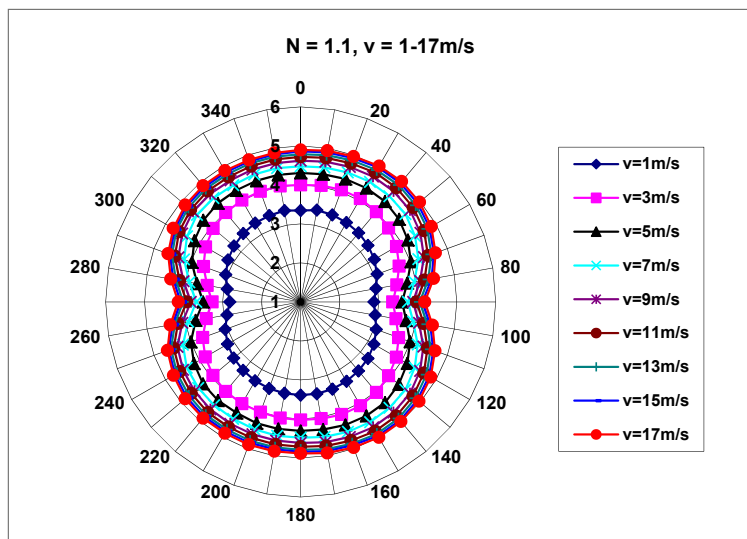
Badany sensor odznacza się wysoką czułością – szczególnie może być stosowany przy małych prędkościach przepływu. Izolowany ceramiczną obudową element mierzący, charakteryzujący się dużą odpornością na czynniki zewnętrzne (zanieczyszczenia, wilgoć) oraz stabilnością czasową i temperaturową

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 szybkich fluktuacji przepływu.

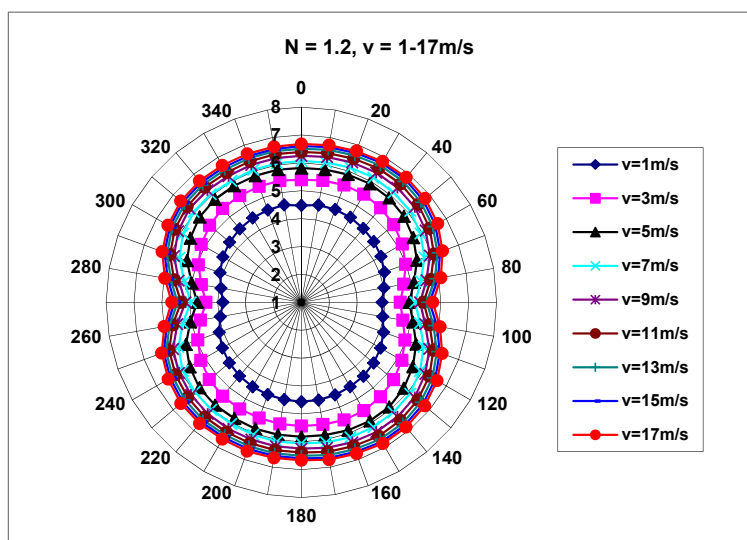
4. Charakterystyki kątowe sensora

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.

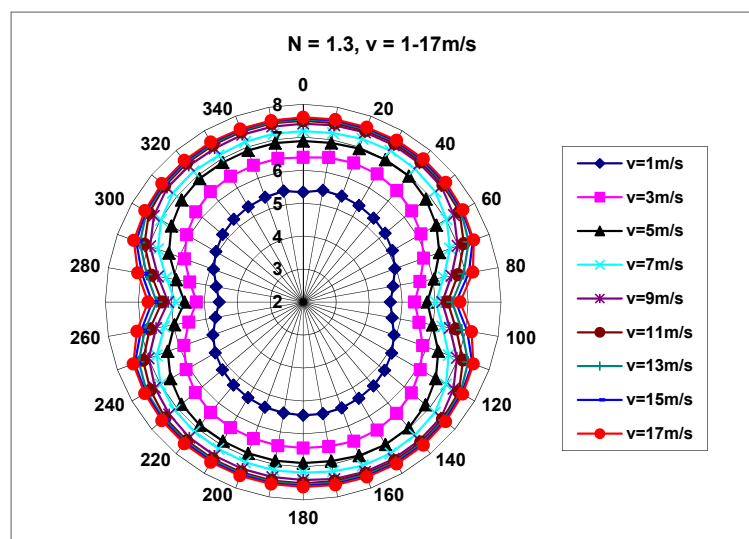
Testowany sensor umieszczono tak jak poprzednio – oś podłużna sensora była pozioma i prostopadła do kierunku przepływu, w centralnej części wylotu tunelu w odległości około 10 mm od krawędzi. Obsadkę czujnika zamontowano w gnieździe rotora, sterowanego komputerowo. Sygnał napięciowy był rejestrowany z krokiem 10° obrotu czujnika wokół osi poprzecznej. Na rysunkach 4-6 przedstawiono charakterystyki kątowe cylindrycznego sensora platynowo-ceramicznego w pełnym zakresie prędkości do 17 m/s, przy różnych współczynnikach nagrzania.



Rys. 4. Charakterystyka kąтовая, zakres prędkości 1÷17 m/s, $N = 1.1$

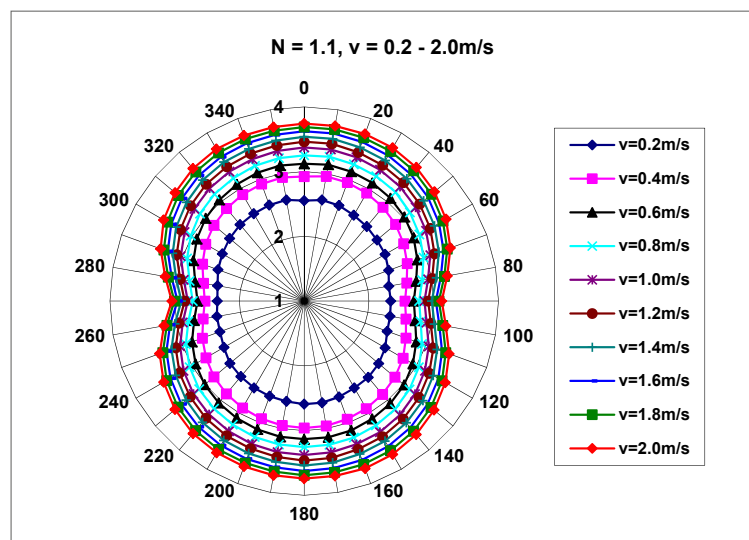


Rys. 5. Charakterystyka kąтовая, zakres prędkości 1÷17 m/s, $N = 1.2$



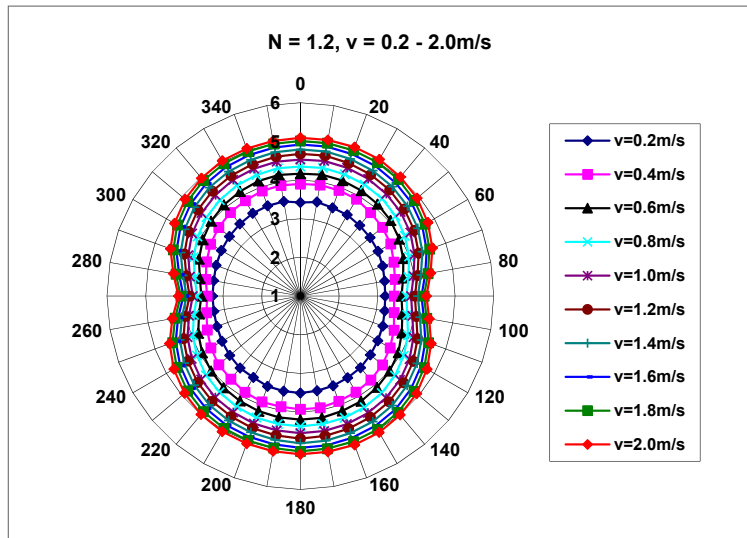
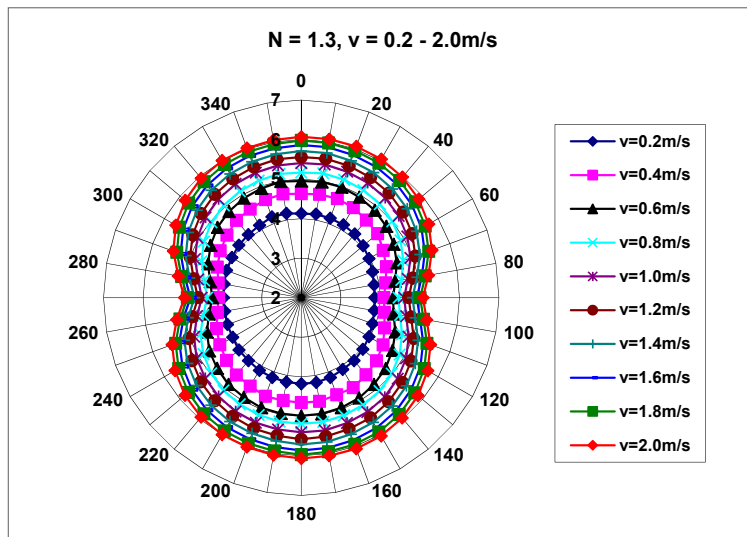
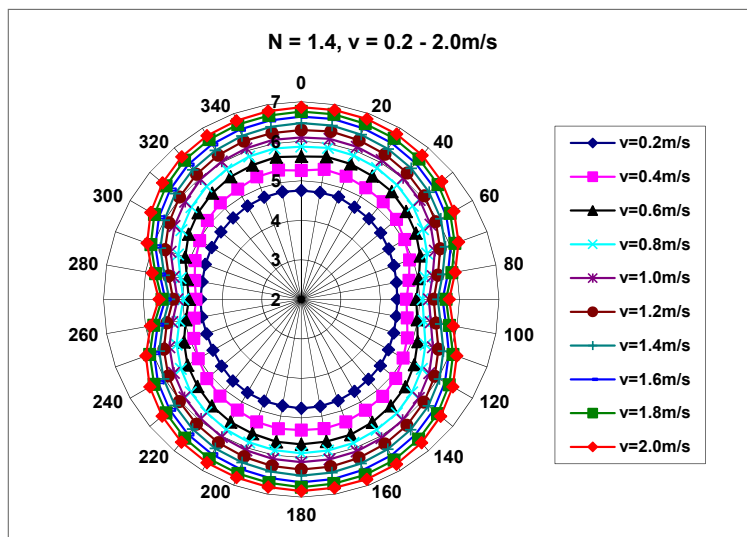
Rys. 6. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości 1÷17 m/s, $N = 1.3$

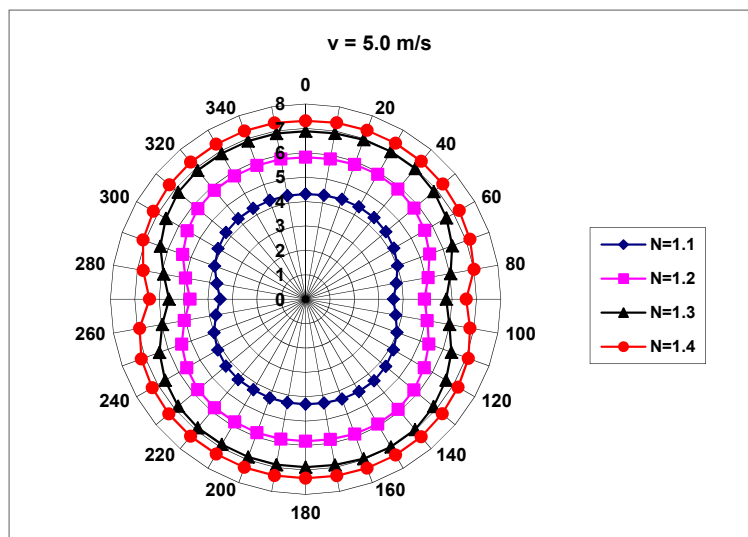
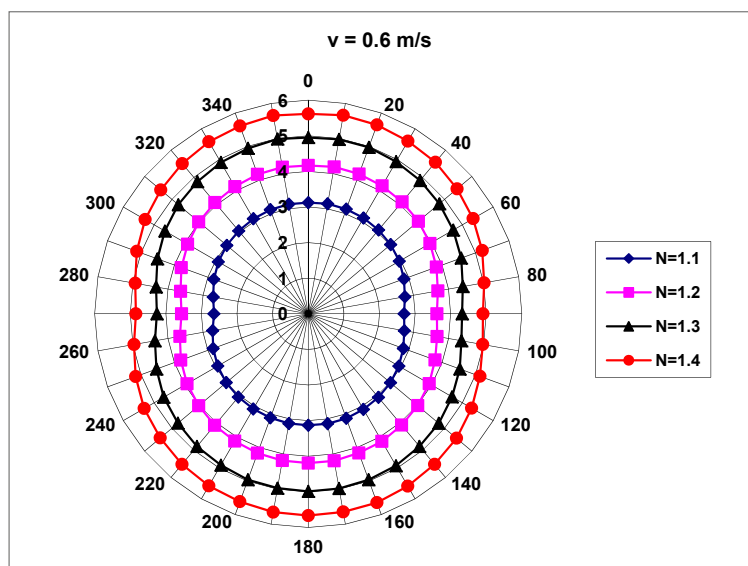
W położeniu wyjściowym – kąt 0° – oś podłużna cylindra jest prostopadła do przepływu W ustawieniu względem napływającego powietrza odpowiadającemu kątom $0^\circ \pm 180^\circ$ otrzymujemy najwyższy sygnał napięciowy. Natomiast w ustawieniach $90^\circ \pm 180^\circ$, czyli wtedy gdy oś podłużna walca jest zgodna z kierunkiem przepływu sygnał jest mniejszy. Kształt i budowa sensora sprawiają, że warunki opływu powierzchni przez strugę są korzystne i uzyskujemy dobry sygnał napięciowy w szerokim obszarze kąta napływu medium na pobocznice sensora. Kolejne rysunki 7, 8, 9, 10 przedstawiają charakterystyki kątowe sensora cylindrycznego w zakresie małych prędkości 0.2÷2 m/s co 0.2 m/s w analogicznych warunkach ustawienia położenia i poziomu nagrzania.



Rys. 7. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości 0.2÷2 m/s, $N = 1.1$

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 11, 12 zamieszczono zestawienie charakterystyk kątowych sensora przy wybranej prędkości, w zmieniających się warunkach nagrzania.

Rys. 8. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości $0.2 \div 2 \text{ m/s}$, $N = 1.2$ Rys. 9. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości $0 \div 2 \text{ m/s}$, $N = 1.3$ Rys. 10. Charakterystyka kątowna, zakres prędkości $0 \div 2 \text{ m/s}$, $N = 1.4$

Rys. 11. Charakterystyka kątowna, prędkość $v = 5 \text{ m/s}$, $N = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$ Rys. 12. Charakterystyka kątowna, prędkość $v = 0.6 \text{ m/s}$, $N = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$

5. Konkluzja

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 wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu. Przedstawione charakterystyki $U(v)$ wskazują na poziom czułości elementu mierzającego 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, lecz wymaga od potencjalnego użytkownika ostrożności i odpowiednich warunków przechowywania ze względu na przestrzenną budowę i ceramiczny materiał, który osłania metaliczne elementy sensora.

Podziękowania: Rezultaty prac przedstawione w artykule stanowią wyniki realizacji Projektu Badawczego 4 T12A 008 30, artykuł opracowano w celach dokumentacyjnych w ramach Prac Statutowych 2025 Instytutu Mechaniki Górniczej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.

Literatura

- [1] Roszczynialski W., Trutwin W., Waclawik J., *Kopalniane pomiary wentylacyjne*. wyd. „Śląsk”, Katowice 1992.
- [2] Kruczkowski J., *Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym*. Praca doktorska IMG PAN Kraków, 1999.
- [3] Ligęza P., *Układy termooanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie nr 98, Kraków 2001.
- [4] Ligęza P., Poleszczyk E., *Badanie właściwości cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych w aspekcie konstrukcji sondy do wyznaczania wektora prędkości przepływu w warunkach kopalnianych*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2007.
- [5] Ligęza P., Poleszczyk E., *Hybrydowy termooanemometryczny system pomiaru składowych wektora prędkości przepływu powietrza w wyrobisku górniczym*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2007.
- [6] Poleszczyk E., *Termooanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości*. Monografie Rozprawy, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2002.
- [7] Błocki J., Godlewski J., Pakoński K., *Gas Cooling for Silicon Strip Detectors*. Nuclear Instruments and Methods, 1993.
- [8] Bremhorst K., Graham L.J.W., *A fully compensated hot/cold wire anemometer system for unsteady flow velocity and temperature measurement*. Meas. Sci. Technol. 425-430, 1990.
- [9] Bruun H.H., *Hot-wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*. University Press, Oxford, 1995.
- [10] Drubka R.E., Tan-atichat J., Nagib H.M., *Analysis of Temperature Compensating Circuits for Hot-wires and Hot-films*; DISA Info. 5-14, 1977.
- [11] Elsner J., Drobnik St., *Metrologia turbulencji przepływów*. Ossolineum, Wrocław, 1995.
- [12] Ligęza P., Sitko S.J., *Problem kompensacji temperaturowej i linearyzacji w anemometrii stalotemperaturowym*. Metrologia i Systemy Pomiarowe nr 9, 1991.
- [13] Ligęza P., *Thermoanemometric method for measuring velocity and temperature in non-isothermal flows*. Archives of Mining Sciences nr 3, 1994.
- [14] Ligęza P., *Sposób kompensacji temperaturowej mostkowego termooanemometru stalotemperaturowego oraz mostkowy termooanemometr stalotemperaturowy skompensowany temperaturowo*. Patent PL 175092 B1, Warszawa, 1994.
- [15] Ligęza P., *High – precision CTA*. MST News, 4, 1997.
- [16] Ligęza P., *A modified temperature-compensation circuit for CTA*. Measurement Science and Technology, 9, 1998.
- [17] Ligęza P., *A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications*. Review of Scientific Instruments, 1, 2000.
- [18] Ligęza P., Poleszczyk E., *Termooanemometryczne metody pomiaru prędkości – aparatura pomiarowa w kopalni*. Archives of Mining Sciences, Vol. 49, Special Issue, 2004.
- [19] Ligęza P., Poleszczyk E., *Charakterystyki metrologiczne cienkowarstwowych sensorów platynowych w zastosowaniu do wielopunktowych pomiarów pola prędkości przepływu*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, nr 3-4, 2004.
- [20] Ligęza P., Poleszczyk E., *Koncepcja i badania modelowe sondy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, nr 3-4, 2004.
- [21] Ligęza P., Poleszczyk E., *Sonda termooanemometryczna do wielopunktowych pomiarów pola prędkości*. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, nr 8, 2005.
- [22] Ligęza P., Poleszczyk E., *Multipoint measurements of flow velocity fields*. Archives of Mining Sciences, Vol. 50, 2005.
- [23] Dziurzyński W., Trutwin W., Cierniak W., *Stany nieustalone w kopalnianych sieciach wentylacyjnych*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, Kraków, 1996.
- [24] Lomas C.G., *Fundamentals of hot wire anemometry*. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [25] Sakao F., *Constant temperature hot wires for determining velocity fluctuations in an air flow accompanied by temperature fluctuations*; J. Phys. E: Sci. Instrum. 913-916, 1973.
- [26] Skotniczny P., *Rozwój strugi powietrza w dyfuzorze prostokątnym*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, Seria: Monografie Rozprawy, Monografia nr 8, 2005.
- [27] Skotniczny P., *Symulacja przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych*. Przegląd Górniczy, 2004.

- [28] Elsner J.W., *Turbulencja przepływów*. PWN Warszawa 1985.
- [29] Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P., *Measurements of Velocity Profile in Heading with the Use of Integrated Hot-Wire Anemometric System*. Archives of Mining Sciences, Vol. 53, 2008.
- [30] Szymkat M., *Komputerowe wspomaganie w projektowaniu układów regulacji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; Warszawa, 1993.
- [31] Waluś St., *Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia, Gliwice, 2003.
- [32] Wala M.A., Jacob J.D. at al., *How scrubbers help ventilate the face during deep cut mining with a blowing curtain*. Proceedings :10-th U.S. Mine Ventilation Symposium / North American, Anchorage, AL, May 2004.
- [33] Branny M., Filipek W., *Numerical simulation of ventilation of blind drifts with a force-exhaust overlap system in condition of methane and dust hazards*. Archives of Mining Science vol. 53, 2, Kraków 2008.
- [34] Fluent Inc. *User manual*. 2005.

Application of the thermal anemometric airflow velocity measurement method in underground mining

Part 2 - Sensor experimental testing

Abstract

Analysis and measurements of ventilation networks are an important element in examining the condition and course of mine ventilation. The efficiency and reliability of the ventilation network system influences the mining process and work safety in the mine. This article presents the concept and prototype of a thermal anemometric measurement system for multi-point velocity field measurements. The system is based on sensors integrated with a signal processing system. An array of such sensors, distributed throughout the examined excavation cross-section, cooperates with a portable, computer-based data acquisition system. This enables simultaneous, multi-point measurement of flow velocity within the examined cross-section. The sensors utilize a unique measurement system based on a modification of a constant-temperature bridge system with temperature compensation. This system is the subject of the authors' patent. The developed measurement system was used to verify computer simulations of air flows in selected areas of mining excavations. This part of the publication series presents the test results of the sensor, which is the main element of the sensor design.

Keywords: Mine ventilation; ventilation network measurements; measurement systems; thermal anemometry; temperature compensation; computer simulations