

Zastosowanie termooanemometrycznej metody pomiaru prędkości przepływu powietrza w górnictwie głębinowym

Część 3 – Prototyp i badania systemu pomiarowego

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

Instytut Mechaniki Górniczej 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 budowę prototypu i wyniki badań opracowanego systemu pomiarowego.

Słowa kluczowe: wentylacja kopalń, pomiary sieci wentylacyjnych, systemy pomiarowe, termooanemometria, kompensacja temperaturowa, symulacja komputerowa

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 Górniczej 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 kom-

pensującego. 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. Budowa termooanemometrycznego systemu wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu

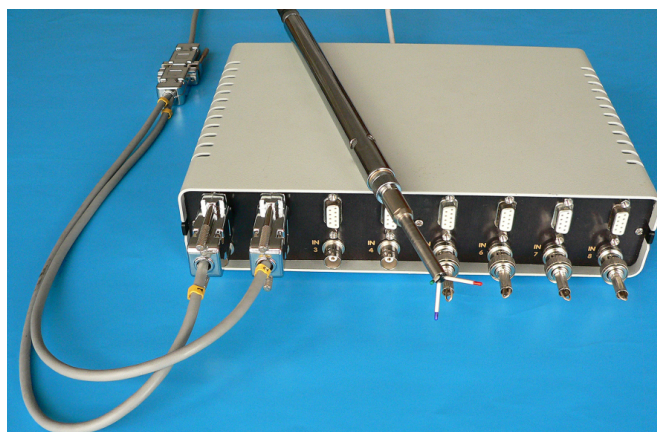
W skład systemu pomiarowego wchodzi sondy termooanemometryczne zintegrowane z układem przetwarzania sygnału oraz układ akwizycji danych pomiarowych z poszczególnych sond. Układ akwizycji danych pracuje w oparciu o wielofunkcyjny moduł DAQ na USB typ: NI USB-6009 firmy National Instruments o następujących 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 umożliwi wyznaczenie składowych wektora prędkości przepływu, wielopunktowy i symultaniczny pomiar pola temperatury i prędkości oraz intensywności turbulencji, a także wyznaczenie strumienia objętościowego. Na Fot. 1. i Fot. 2. przedstawiono termooanemometryczny system pomiaru wektora prędkości przepływu.



Fot. 1. Termooanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu



Fot. 2. Termooanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu

3. Wzorcowanie sondy do wyznaczania składowych wektora prędkości

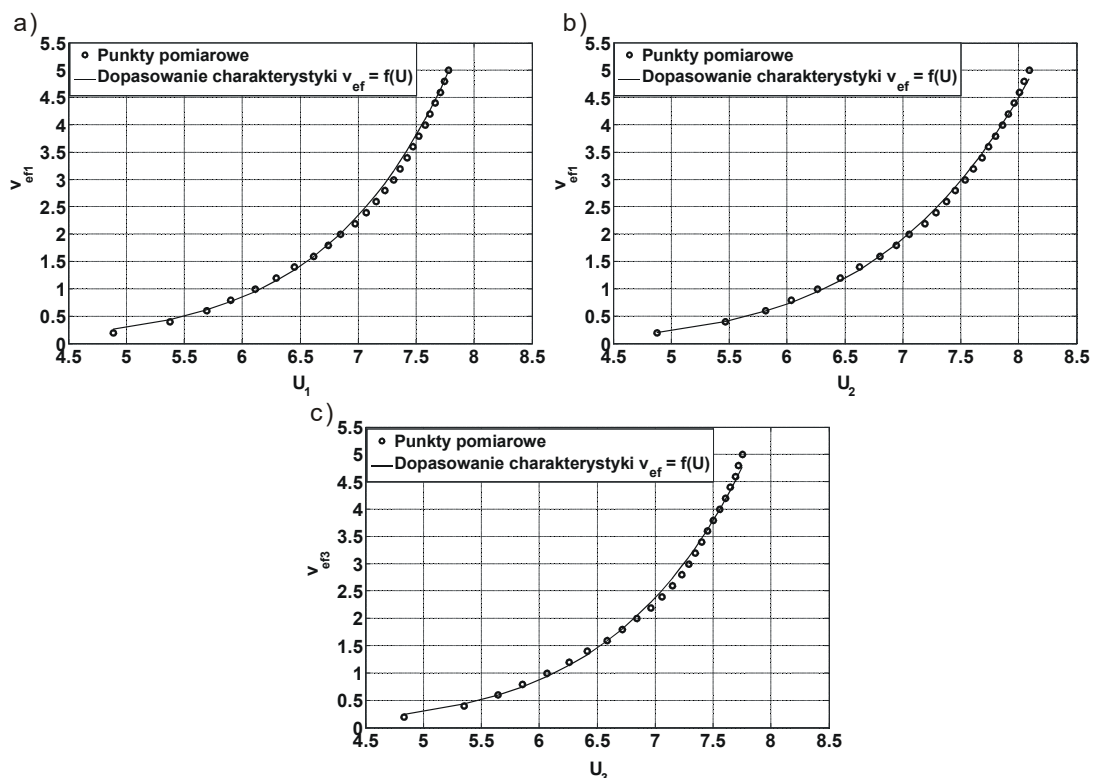
Wzorcowanie i badania właściwości metrologicznych zintegrowanych głowic pomiarowych do wyznaczania wektora prędkości przepływu przeprowadzono na uniwersalnym stanowisku pomiarowym, którego szczegółowy opis zawarty jest np. w pracach [4,6].

Trójelementowy czujnik pomiarowy podczas wzorcowania był ustawiany w centralnym punkcie wylotu z tunelu aerodynamicznego w taki sposób, że jeden z elementów mierzonych był równoległy w stosunku do kierunku przepływu, przy prostopadłym ustawieniu dwóch pozostałych. Ponieważ każdy z elementów mierzonych wzorcowany jest oddzielnie, sonda obracana była co 120° wokół własnej osi. Pomiarów wykonano dla prędkości z zakresu od 0.2 do 5 m/s zmienianej co 0.2 m/s. Proces wzorcowania przebiega dwuetapowo. W pierwszym kroku, do danych pomiarowych otrzymanych przy napływie prostopadłym na element mierzący dopasowywana jest zależność (1). Przyjmuje się, że przy napływie prostopadłym do elementu prędkość efektywna v_{ef} jest równa prędkości zadawanej v_t . W wyniku dopasowania otrzymywane są parametry A_i , B_i , n_i dla poszczególnych sensorów. Na Rys. 1. przedstawiono dopasowanie zależności (1) do danych pomiarowych.

$$v_{ef_i} = \left[\frac{(U_i^2 - A_i)}{B_i} \right]^{n_i} \quad (1)$$

gdzie:

- A, B, n – współczynniki uzyskiwane podczas wzorcowania elementu mierzącego,
- U – napięcie będące sygnałem pomiarowym z sensora,
- v_{ef} – prędkość efektywna.



Rys. 1. Dopasowanie zależności (1) do danych pomiarowych dla poszczególnych elementów sondy

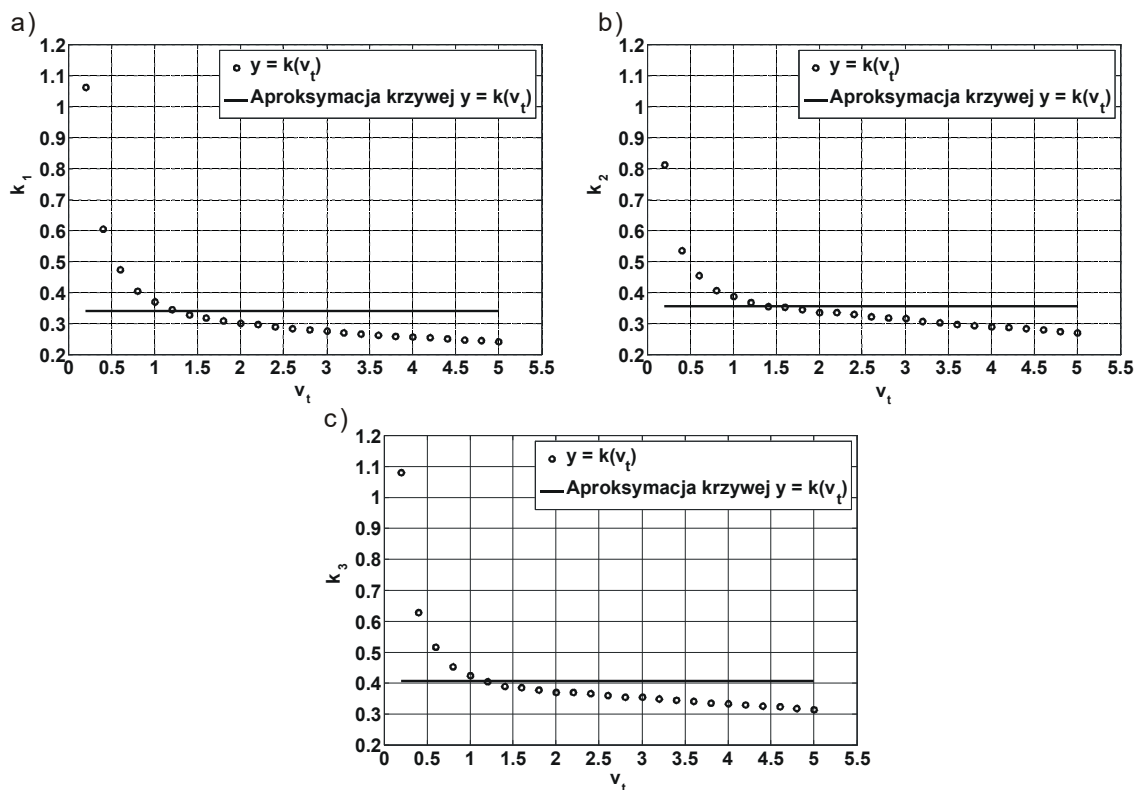
Natomiast w drugim etapie wyznaczone są współczynniki k_i potrzebne do przeliczenia prędkości efektywnej dla poszczególnych elementów na składowe prędkości przepływu według zależności (2).

$$v^2 = K^{-1} \cdot v_{ef}^2 \quad (2)$$

gdzie:

$$K = \begin{bmatrix} k_1^2 & 1 & 1 \\ 1 & k_2^2 & 1 \\ 1 & 1 & k_3^2 \end{bmatrix}, v^2 = \begin{bmatrix} v_x^2 \\ v_y^2 \\ v_z^2 \end{bmatrix}, v_{ef}^2 = \begin{bmatrix} v_{ef1}^2 \\ v_{ef2}^2 \\ v_{ef3}^2 \end{bmatrix}$$

W etapie drugim na podstawie zadawanej w tunelu aerodynamicznym prędkości v_t oraz prędkości efektywnej wyznaczonej przy napływie równoległym na element mierzący obliczany jest dla każdego włókna oddzielnie zbiór współczynników $k(v_t)$ dla różnych prędkości. W celu otrzymania konkretnej wartości k_i w macierzy K aproksymuje się zależności $k(v_t)$ wartością stałą (Rys. 2).



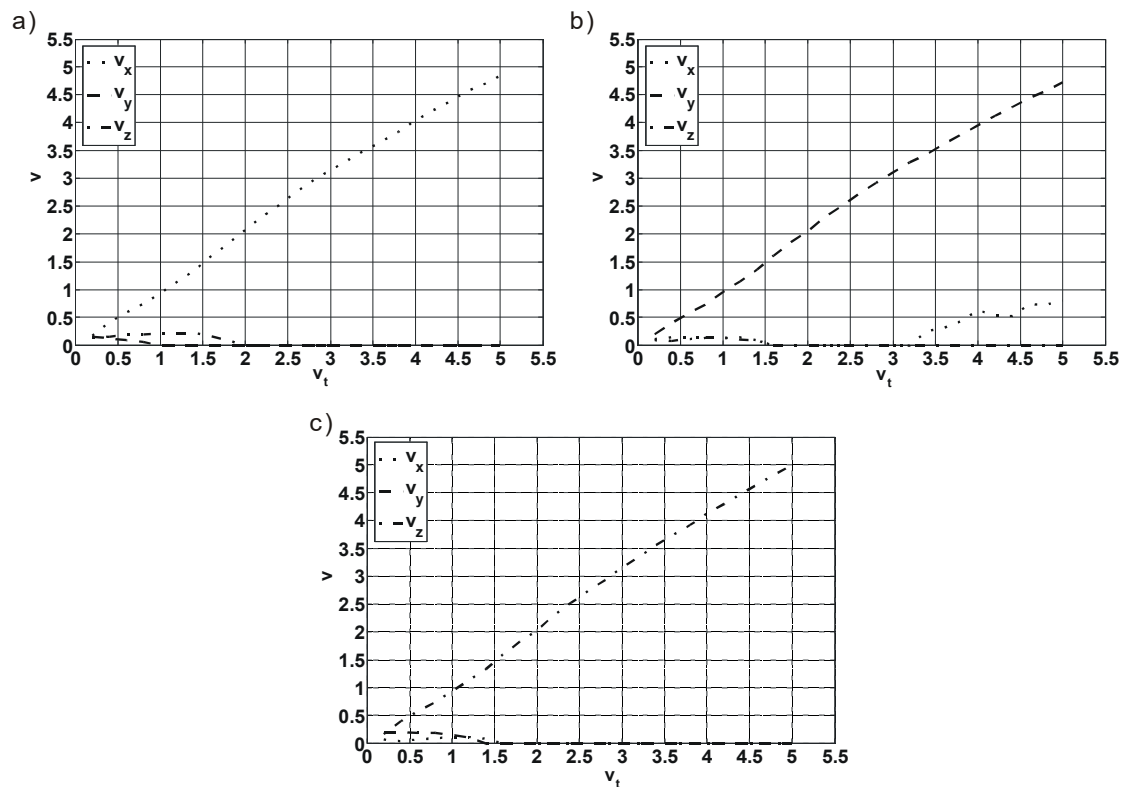
Rys. 2. Aproksymacja zależności $k(v_t)$ dla poszczególnych elementów sondy

Współczynniki A_i , B_i , n_i oraz k_i zostały wyznaczone za pomocą metody optymalizacyjnej *simplex*, dostępnej w pakiecie MATLAB 7.0. Jako wskaźnik dopasowania przyjęto sumę kwadratów odchyłek względnych. W tabeli 1 umieszczono wyznaczone parametry.

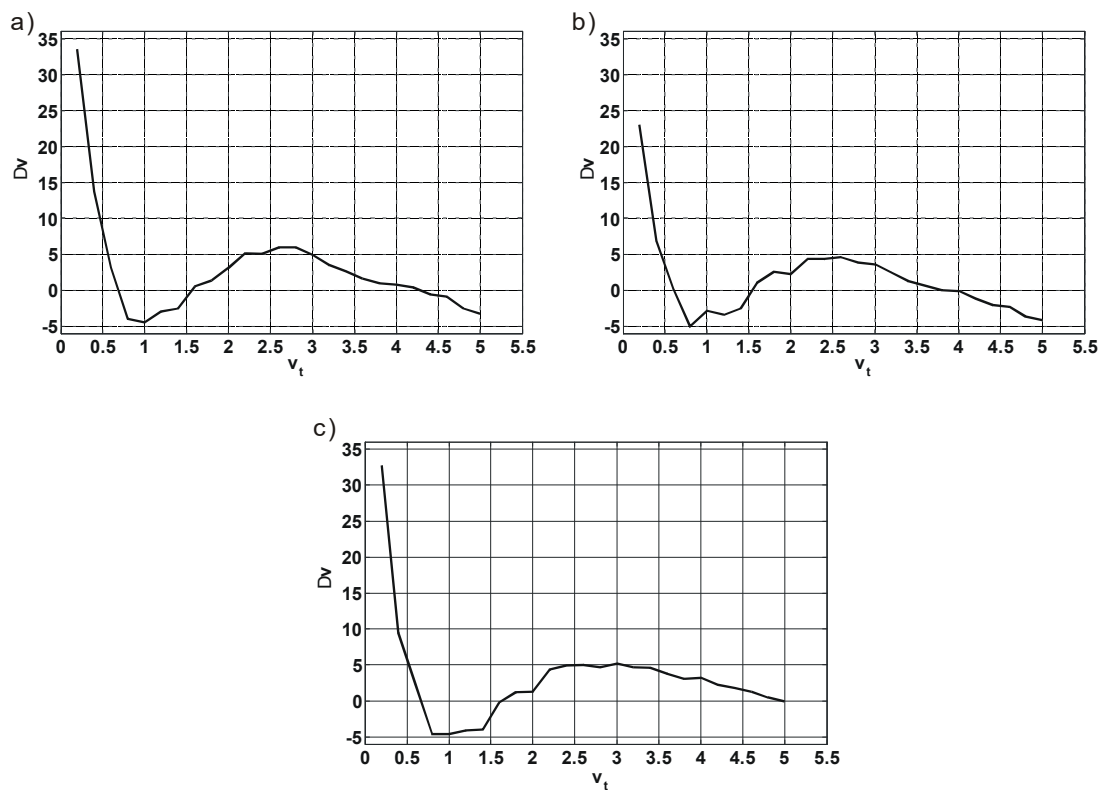
Tab. 1. Otrzymane parametry dla sondy pomiarowej

	A	B	n	k
1	-19.841	57.796	4.865	0.340
2	-1.606	41.547	3.297	0.354
3	-10.219	47.812	4.044	0.406

Otrzymane w wyniku wzorcowania parametry umożliwiają przeliczenie otrzymanych napięć pomiarowych z czujnika na składowe wektora prędkości przepływu. Na Rys. 3. przedstawiono rozkład wektora prędkości na składowe dla trzech ustawień sondy podczas wzorcowania, gdy każdy z trzech elementów mierzących był zorientowany równoległe do przepływu, a dwa pozostałe prostopadle.



Rys. 3. Rozkład wektora na składowe w przypadku, gdy równoległe do przepływu ustawiony jest element: a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci



Rys. 4. Błąd względny dla modułu prędkości w przypadku, gdy równoległe do kierunku przepływu ustawiony jest element: a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci

Na Rys. 4. przedstawiono błąd względny obliczonego modułu wektora prędkości i prędkości zadawanej w tunelu aerodynamicznym, dla przypadków pokazanych na Rys. 3. Błąd względny został wyznaczony z następującej zależności:

$$\Delta v = \frac{|v| - v_t}{v_t} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

v_t – wartość prędkości zadawana w tunelu aerodynamicznym,
 $|v|$ – wyznaczony moduł prędkości przepływu.

4. Wzorcowanie sondy potrójnej w zakresie małych prędkości

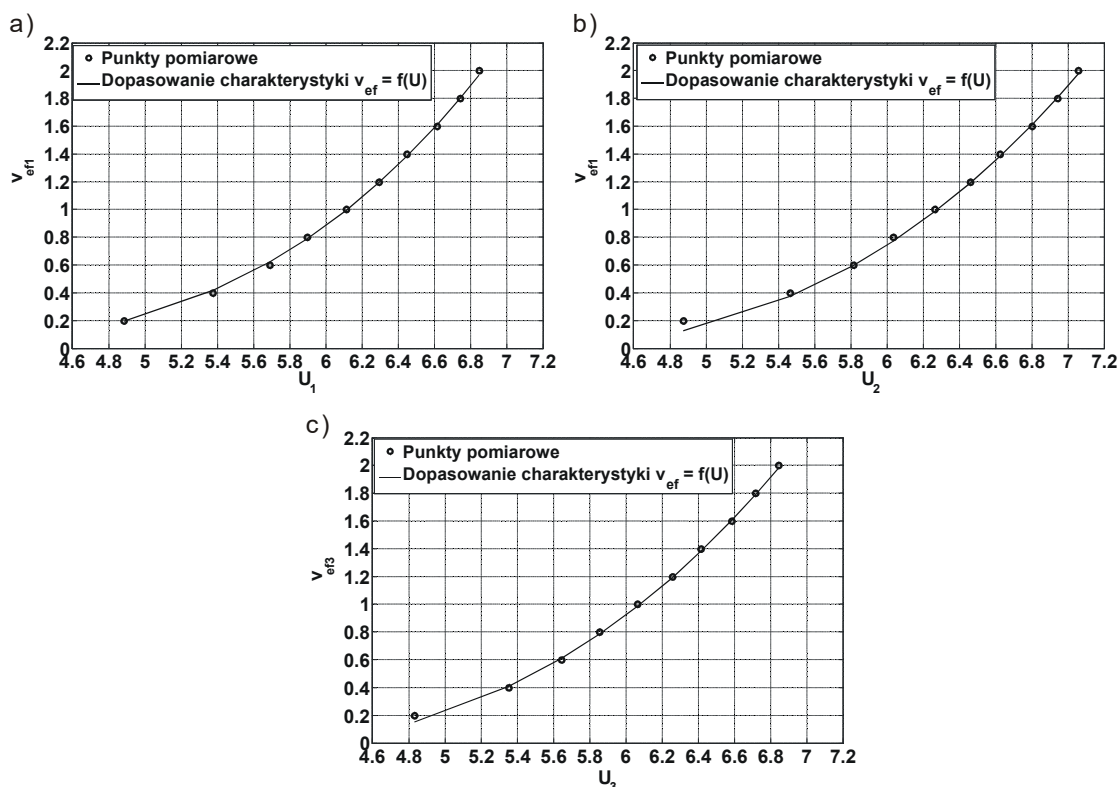
Prezentowana sonda bardzo dobre właściwości metrologiczne w zakresie małych prędkości przepływu. Dlatego też wywzorcowano ją dodatkowo dla prędkości z zakresu od 0.2 do 2 m/s zmienianej co 0.2 m/s. Na Rys. 5. przedstawiono dopasowanie zależności (1) do danych pomiarowych. Natomiast Rys. 6. prezentuje aproksymację zależności $k(v_t)$ dla poszczególnych elementów mierzących.

Parametry otrzymane podczas wzorcowania dla małych prędkości przedstawiono w tabeli 2.

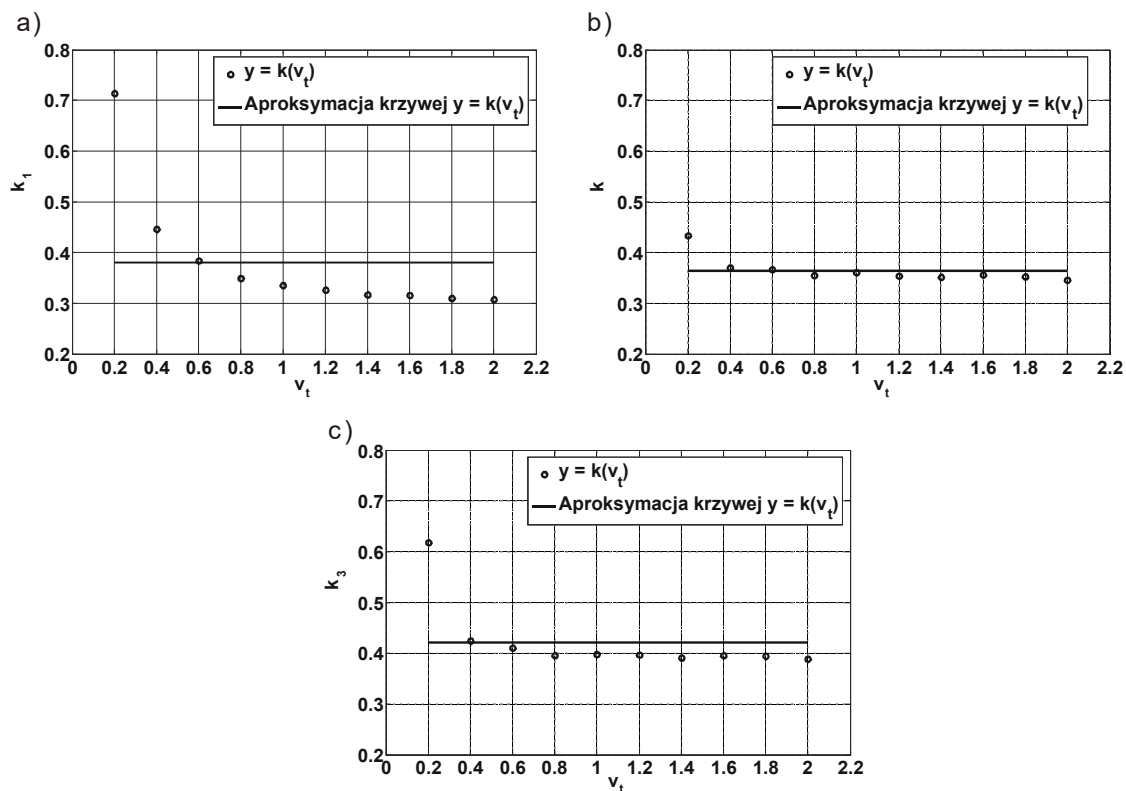
Tab. 2. Parametry otrzymane dla sondy pomiarowej w zakresie prędkości od 0.2 do 2 m/s

	A	B	n	k
1	11.773	25.643	2.163	0.381
2	16.056	23.361	1.861	0.365
3	16.225	20.712	1.755	0.421

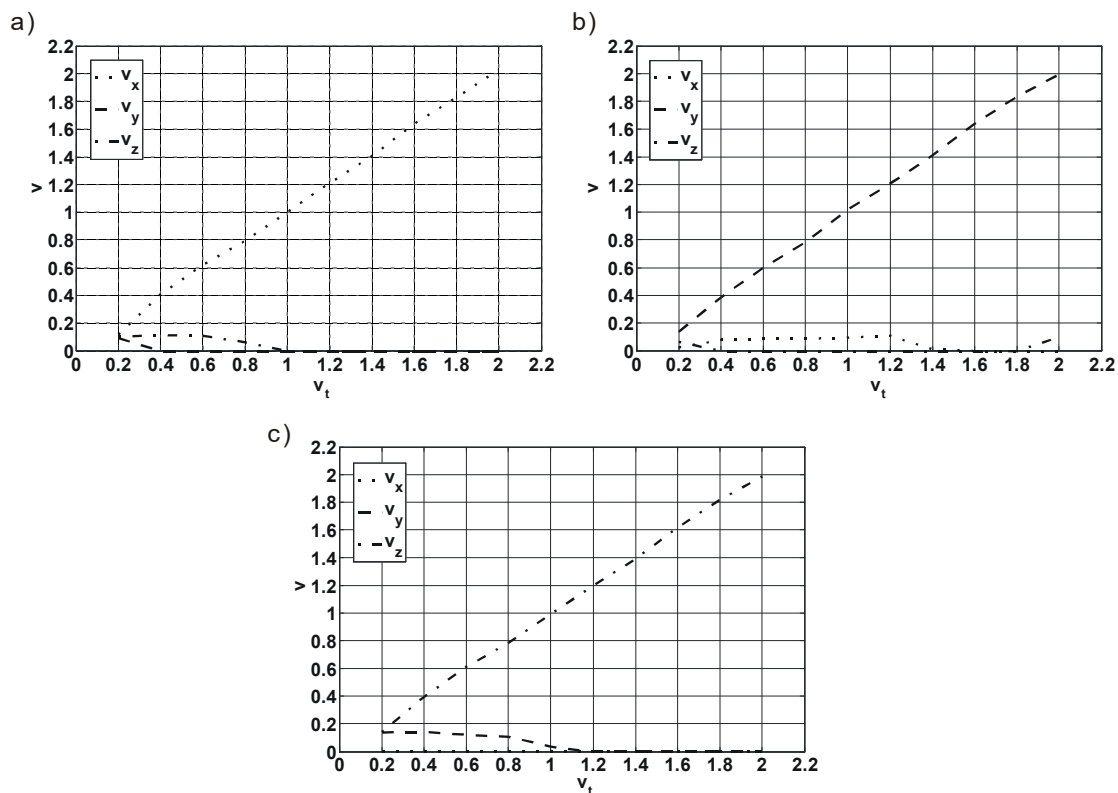
Rozkład wektora prędkości przepływu dla ustawień sondy z wzorcowania przedstawiono na Rys. 7, natomiast błąd względny na Rys. 8.



Rys. 5. Dopasowanie zależności 1) do danych pomiarowych dla poszczególnych elementów sondy w zakresie małych prędkości przepływu

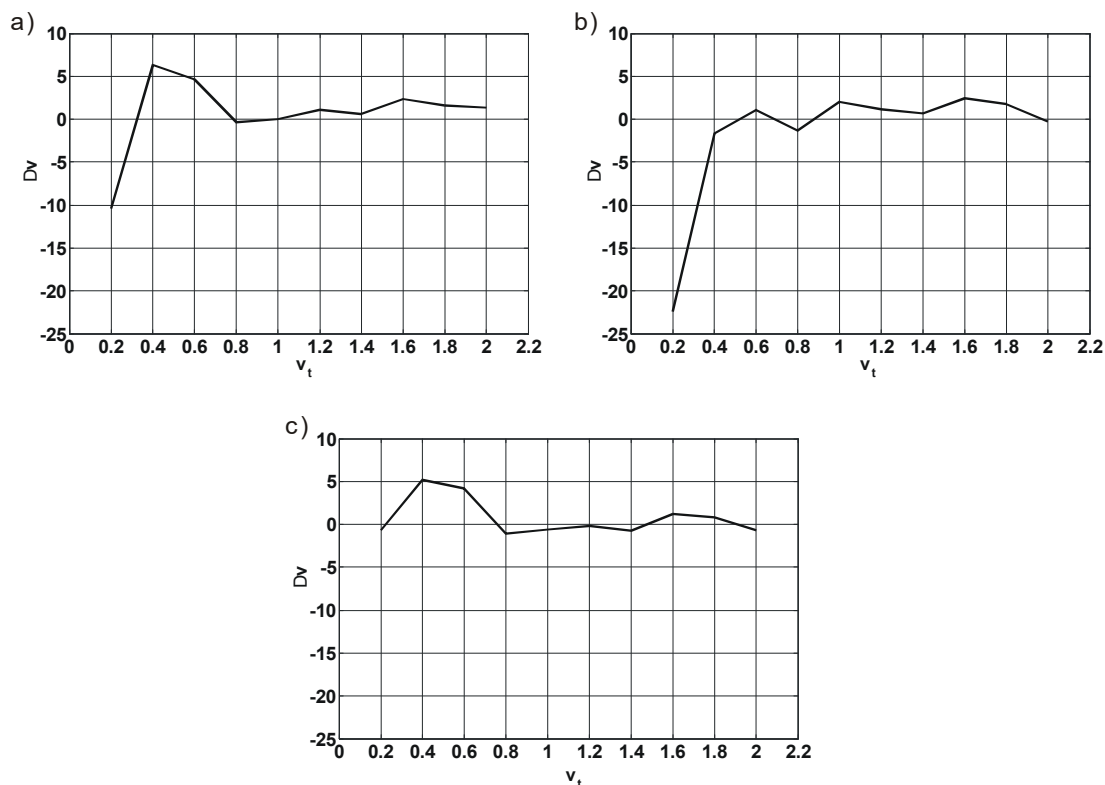


Rys. 6. Aproksymacja zależności $k(v_t)$ dla poszczególnych elementów sondy w zakresie małych prędkości przepływu



Rys. 7. Rozkład wektora prędkości w przypadku, gdy równoległe do przepływu ustawiony jest element: a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci

Zastosowana metoda wzorcowania potrójnej sondy do wyznaczania wektora prędkości przepływu została opisana szeroko w pracy [6]. Modyfikację stanowi uproszczenie procedury, które polega na wprowadzeniu aproksymacji zależności współczynnika k od prędkości zadanej v_t wartością stałą.



Rys. 8. Błąd względny dla modułu prędkości w przypadku, gdy równoległe do przepływu ustawiony jest element:
a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci

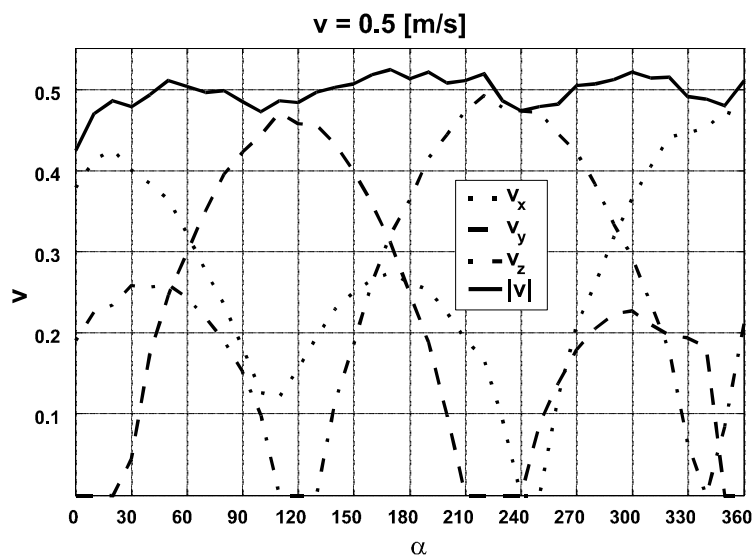
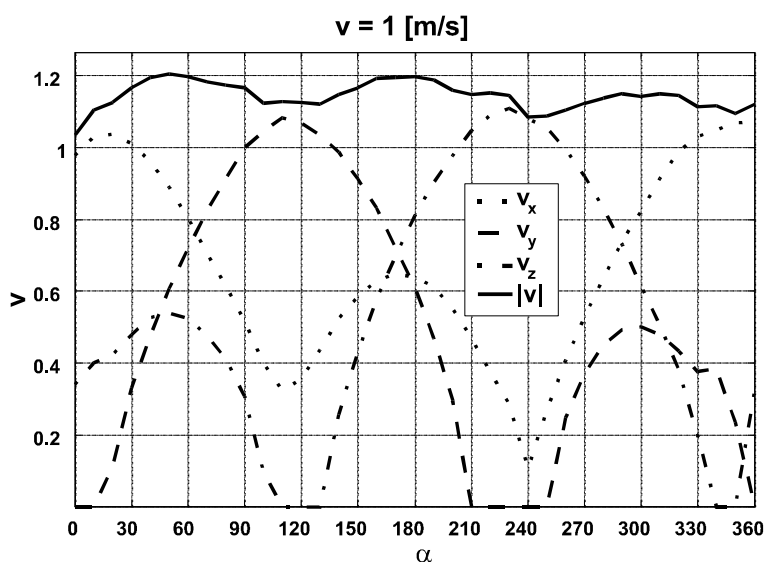
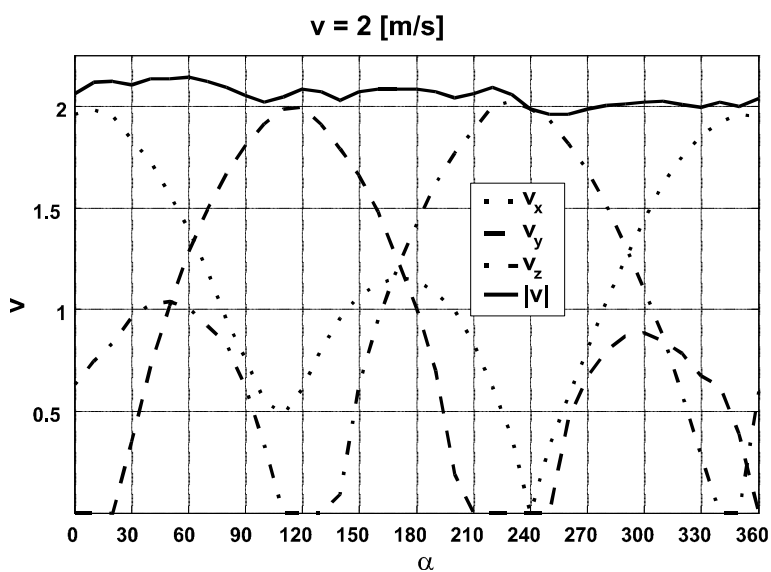
5. Wyznaczanie składowych i modułu wektora prędkości

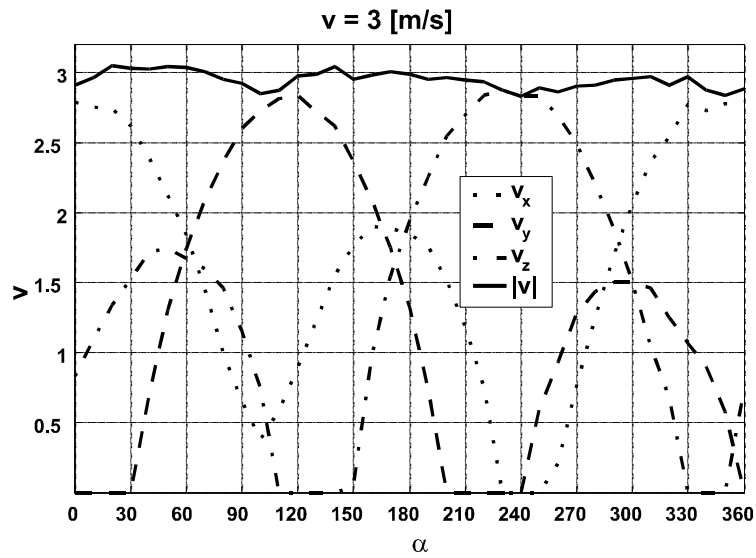
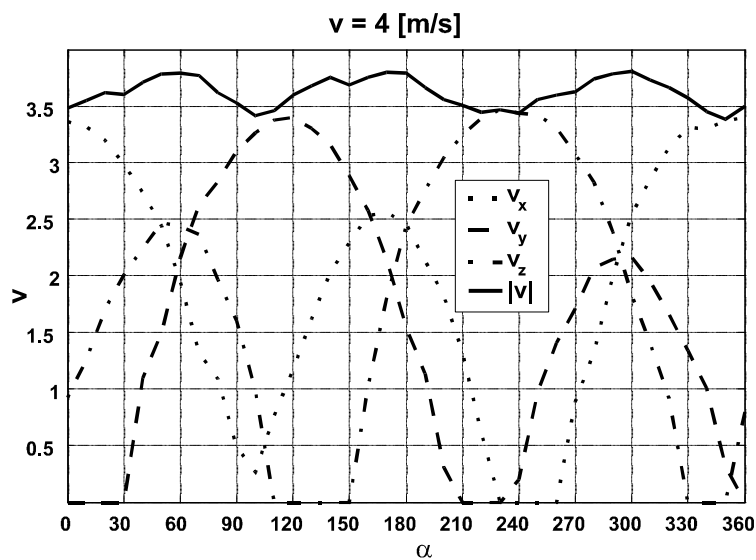
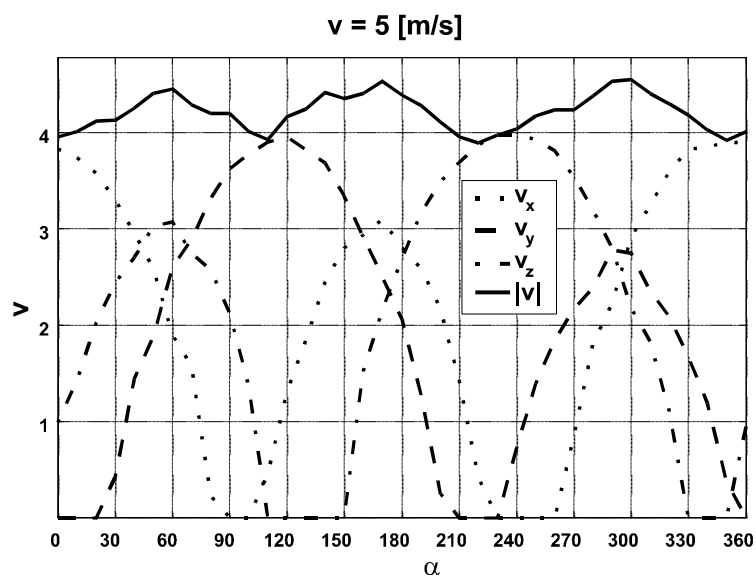
Po wywzorcowaniu trójelementowej sondy do wyznaczania wektora prędkości przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych testy pomiarowe w zakresie prędkości od 0 do 5 m/s. Między innymi wykonano charakterystyki kątowe sondy dla różnych kątów napływu medium na elementy mierzące sondy.

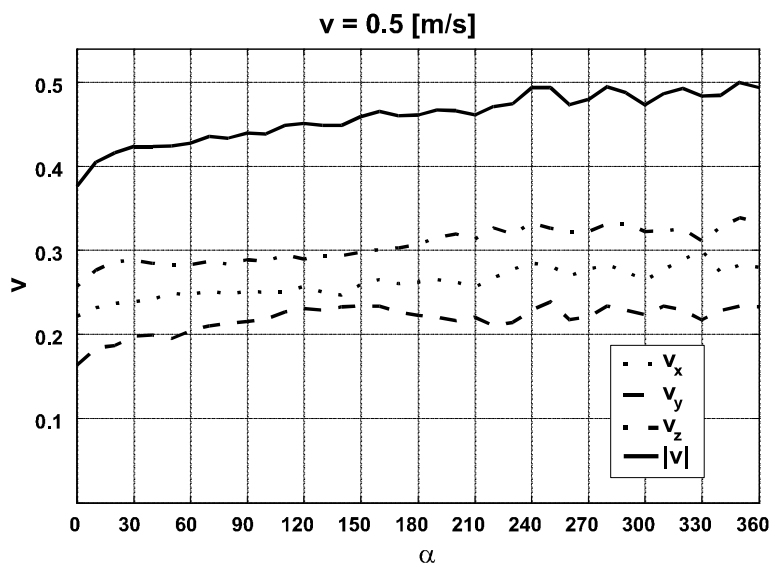
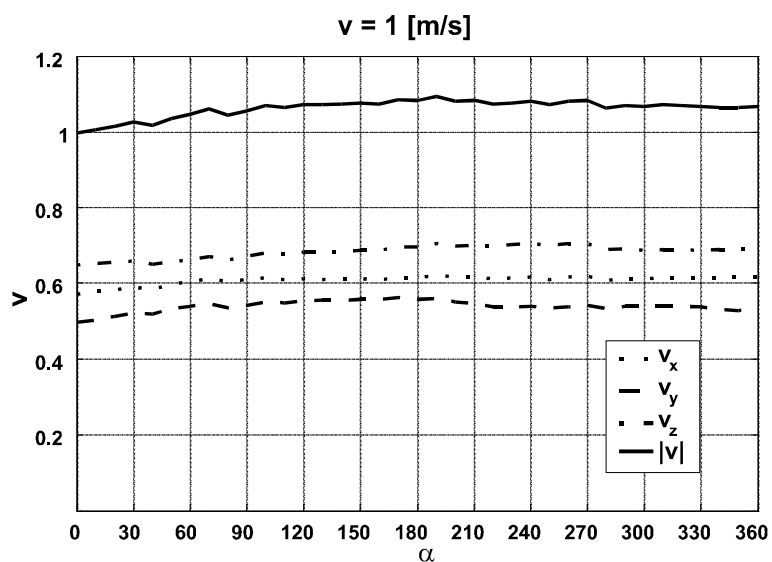
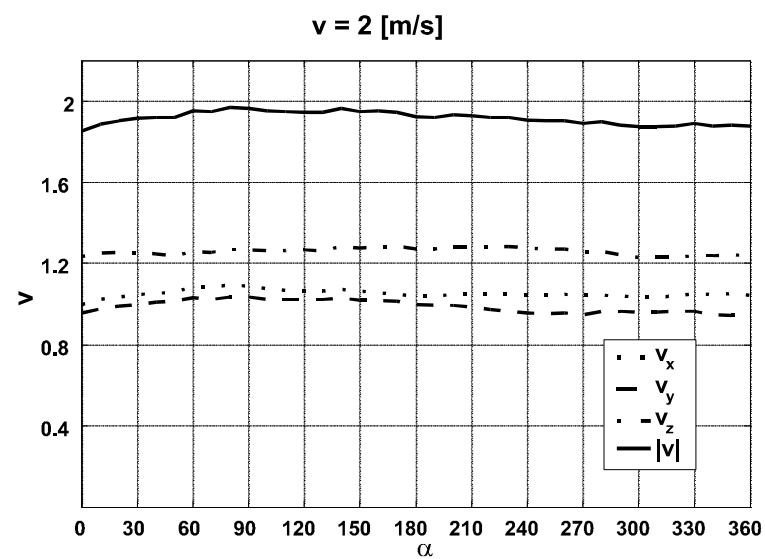
Termoanemometryczną głowicę wraz z potrójnym czujnikiem umieszczono na wylocie tunelu aerodynamicznego w strudze wydmuchiwanej. Specjalny uchwyt zamontowany w gnieździe urządzenia obrotowego umożliwił sterowany komputerowo obrót sondy wokół własnej osi w zakresie 360° z zadaniem krokiem 10° . W każdym z położenia sondy, rejestrowane były sygnały napięciowe z każdego z trzech elementów mierzących, na podstawie których zostały wyznaczone składowe i moduł wektora prędkości przepływu.

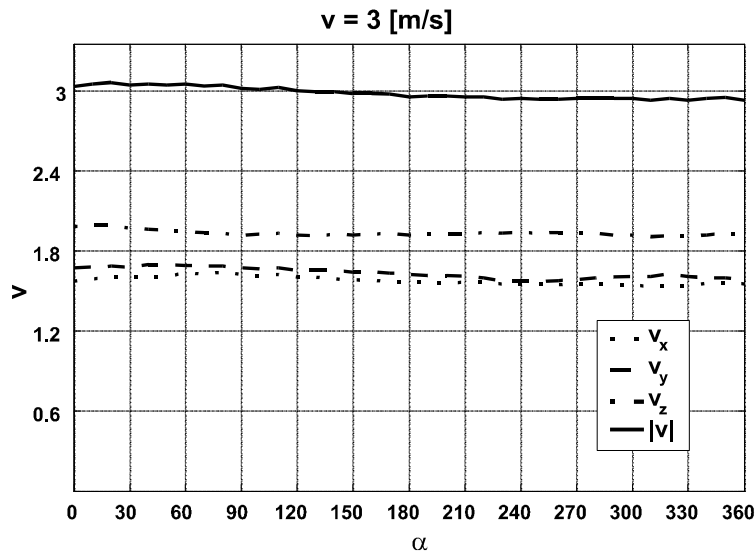
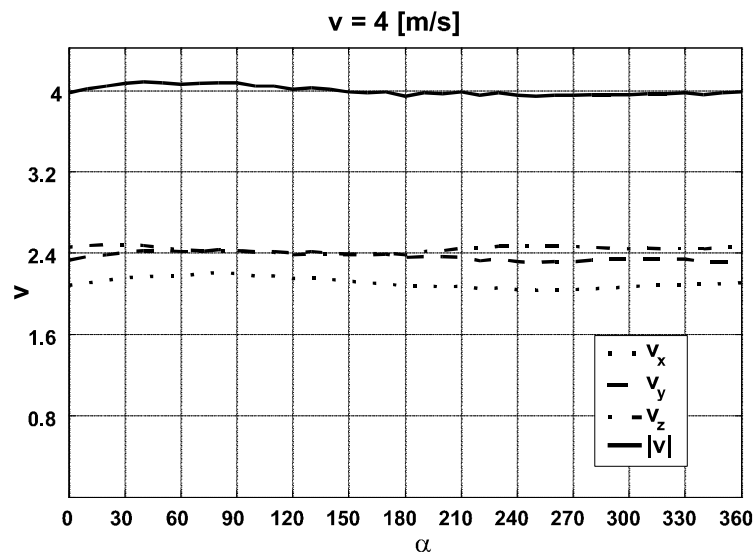
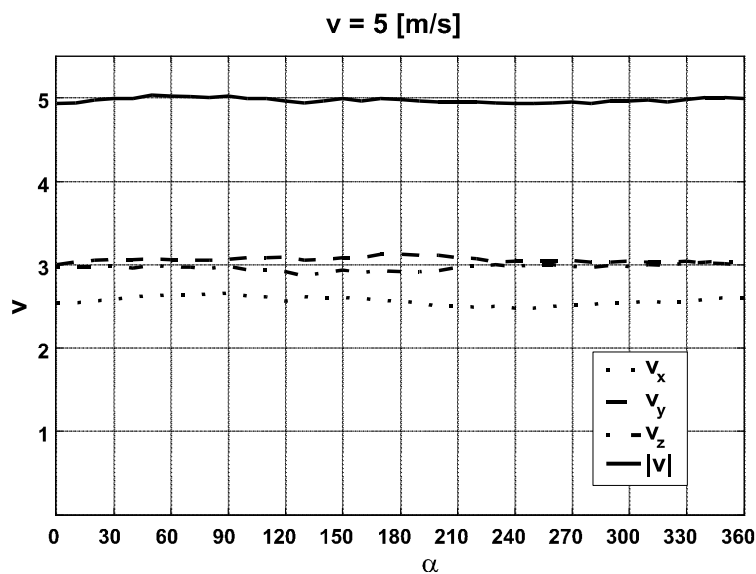
Prezentowane poniżej wyniki dotyczą pomiarów charakterystyk kątowych wykonanych w dwóch charakterystycznych położeniach osi sondy względem napływającego medium. Zarejestrowano charakterystyki kątowe w ustawieniu, kiedy kąt pomiędzy osią sondy a wektorem prędkości wynosi ok. 54.7° . Jest to pozycja, w której sonda jest wzorcowana, czyli układ wyjściowy obrotu sondy charakteryzujący się równoległością jednego elementu i prostokątnością dwóch pozostałych do kierunku napływu. Drugie położenie sondy to takie, przy którym napływ medium jest jednakowy na wszystkie elementy mierzące, czyli oś sondy pokrywa się z osią tunelu a kąt natarcia wynosi 0° . Na kolejnych rysunkach 9 do 14 przedstawiono charakterystyki kątowe sondy przy zadanej prędkości z zakresu od 0 do 5 m/s i kącie napływu 54.7° .

Na kolejnych rysunkach 15 do 20 przedstawiono charakterystyki kątowe sondy w ustawieniu charakteryzującym się równoległością osi sondy do kierunku wektora prędkości przepływu.

Rys. 9. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 0.5$ m/s, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$ Rys. 10. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 1.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$ Rys. 11. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 2.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$

Rys. 12. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 3.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$ Rys. 13. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 4.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$ Rys. 14. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 5.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$

Rys. 15. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 0.5$ m/s, kąt napływu $\beta = 0^\circ$ Rys. 16. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 1.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 0^\circ$ Rys. 17. Charakterystyka kątowa potrójnej sondy, $v = 2.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 0^\circ$

Rys. 18. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 3.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 0^\circ$ Rys. 19. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 4.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 0^\circ$ Rys. 20. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 5.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 0^\circ$

6. Konkluzje

Na niektórych rysunkach pierwszej grupy wyników obserwujemy w wyznaczeniu modułu niedokładności rzędu 10%. Natomiast na charakterystykach kątowych sondy wykonanych w ustawieniu zgodnym z kierunkiem napływu, czyli wtedy, gdy teoretycznie napływ na wszystkie elementy mierzące jest jednakowy, uzyskujemy bardzo dobrą dokładność wyznaczonego modułu wektora prędkości. Różnice obserwowane w obrazie przebiegu wyznaczonych składowych wektora prędkości wynikają prawdopodobnie z pewnych niedokładności w ustawieniu przestrzennym elementów tworzących bazę pomiarową sondy. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że badany czujnik jest prototypem, którego konstrukcję i technologię wykonania autorzy zamierzają w dalszym ciągu doskonalić. Zmniejszanie wielkości wyznaczonego modułu można tłumaczyć faktem tworzenia się strefy stagnacji w obszarze pomiarowym sondy z powodu dosyć dużych rozmiarów korpusu czujnika i głowicy termoanemometrycznej, z którą jest bezpośrednio połączony. Z kolei w niektórych położeniach duże rozmiary sondy mogą zawężać przekrój wydmuchiwanej strugi na wylocie z tunelu i może mieć to wpływ na zawyżanie wielkości wyznaczonego modułu wektora prędkości.

Dalsze badania właściwości głowicy do wyznaczania składowych wektora prędkości prowadzone w warunkach wyrobiska górniczego umożliwią optymalizowanie metody pomiarowej i budowy sondy wieloelementowej.

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] Roszczyniański 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 termoanemometryczne – 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 termoanemometryczny 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., *Termoanemometryczna 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-atchat 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 termoanemometru stalotemperaturowego oraz mostkowy termoanemometr 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., *Termoanemometryczne 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 termoanemometryczna 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 Górotworu 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 3 – Prototype and testing of the measurement system

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 construction of the prototype and the test results of the developed measurement system.

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