

Hybrydowy termooanemometryczny system pomiaru składowych wektora prędkości przepływu powietrza w wyrobisku górnicyzm

PAWEŁ LIGĘZA, ELŻBIETA POLESZCZYK

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono założenia, koncepcję i konstrukcję hybrydowego termooanemometrycznego systemu wyznaczenia składowych wektora prędkości przepływu powietrza w warunkach specjalnych np. w przemyśle lub górnicyzm.

Omówiono szczegółowo budowę i technologię wykonania sondy trójelementowej, której baza pomiarowa składa się z trzech miniaturowych, cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych wzajemnie do siebie prostopadłych, tworzących w przestrzeni naroże sześciianu.

Przedstawiono wyniki wzorcowania i pomiarów składowych wektora prędkości przepływu otrzymane na drodze badań laboratoryjnych potrójnej termooanemometrycznej głowicy zintegrowanej.

Opisane badania są traktowane jako wstępne testy laboratoryjne, po których będą wykonane pomiary w warunkach kopalnianych. Skonstruowany system pomiarowy docelowo będzie zastosowany do eksperymentalnej weryfikacji numerycznej symulacji przepływu w wyrobisku górnicyzm.

Słowa kluczowe: hybrydowy termooanemometryczny system pomiarowy, sonda zintegrowana, wektor prędkości przepływu

1. Wprowadzenie

W Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN został zaprojektowany i skonstruowany hybrydowy termooanemometryczny system wyznaczenia składowych wektora prędkości przepływu w warunkach specjalnych np. w wyrobisku górnicyzm.

Pomiar prędkości jako wielkości wektorowej wymaga określenia trzech składowych wektora prędkości. W praktyce pomiarowej bardzo często mamy do czynienia z sytuacją, kiedy kierunek wektora prędkości jest znany i stały np. w tunelach pomiarowych czy kanałach wentylacyjnych i wówczas pomiar sprowadza się do określenia wartości prędkości. Istnieje jednak wiele zagadnień metrologicznych, gdzie nie można z góry określić kierunku wektora prędkości lub zmienia się on w czasie np. w badaniach rozprywu powietrza w komorach czy przy opływie elementów przestrzennych itp. Zachodzi wówczas konieczność równoczesnego pomiaru wszystkich składowych wektora prędkości.

Sonda pomiarowa i oparty na niej system został opracowany dla przeprowadzenia eksperymentalnej weryfikacji numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku górnicyzm. System jest przystosowany do specyficznych warunków pracy w kopalni (przepływ nieustalony i nieizotermiczny, o znacznym stopniu zanieczyszczenia i wilgotności [1]). Termooanemometryczny system pomiarowy do wyznaczenia składowych wektora prędkości jest oparty na trójelementowych czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Głowica zintegrowana składająca się z trójelementowej sondy i trójukładowego systemu przetwarzania danych współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych.

W systemie zastosowano oryginalny układ pomiarowy oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury. Nowe rozwiązanie technologiczne polega również na

zastosowaniu do pomiaru przepływów wolnozmiennych miniaturowych sensorów platynowo-ceramicznych, jako czujnika anemometrycznego i kompensującego. Czujniki takie posiadają bardzo dobrą stabilność czasową i temperaturową oraz dużą odporność mechaniczną, co jest szczególnie istotne w zastosowaniu do układu termooanemometrycznego przeznaczonego do pomiarów w warunkach kopalnianych. Właściwości metrologiczne elementów pomiarowych czyli miniaturowych, cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych zastosowanych w głowicach zostały zbadane laboratoryjnie [2]. Opisane sondy i system pomiarowy mogą znaleźć zastosowanie także w innych zagadnieniach badawczych metrologii przepływów, tam gdzie mamy do czynienia z pomiarami trójwymiarowych pól prędkości i temperatury.

2. Koncepcja systemu pomiarowego

Hybrydowy termooanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu powstał jako rozwinięcie systemu wielopunktowych i współczesowych pomiarów prędkości i temperatury opartego na zintegrowanych głowicach pomiarowych. System ten wyposażony w różne typy głowic pomiarowych, pozwalał na wielopunktowe pomiary pola prędkości i temperatury oraz określenie kierunku i zwrotu przepływu. Zintegrowane głowice termooanemometryczne, w którym elementem mierzącym jest cienkowarstwowy sensor platynowo-ceramiczny lub włókno metaliczne zostały przystosowane do trudnych warunków pracy w wyrobisku górnictwem.

Przy opracowaniu koncepcji systemu pomiarowego przyjęto następujące założenia:

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

W skład systemu wchodzi sondy termooanemometryczne zintegrowane z układem przetwarzania sygnału oraz układ akwizycji danych pomiarowych z poszczególnych sond [3]. Rozmieszczenie sond pomiarowych w wybranych punktach badanego przepływu, a następnie rejestracja i przetwarzanie sygnałów z poszczególnych sond umożliwia współczesowy pomiar pola temperatury i prędkości oraz wyznaczenie strumienia objętościowego przepływu płynu. Poza pomiarem temperatury i prędkości opracowano również warianty sondy do detekcji zwrotu przepływu oraz do pomiarów przepływów szybkozmiennych.

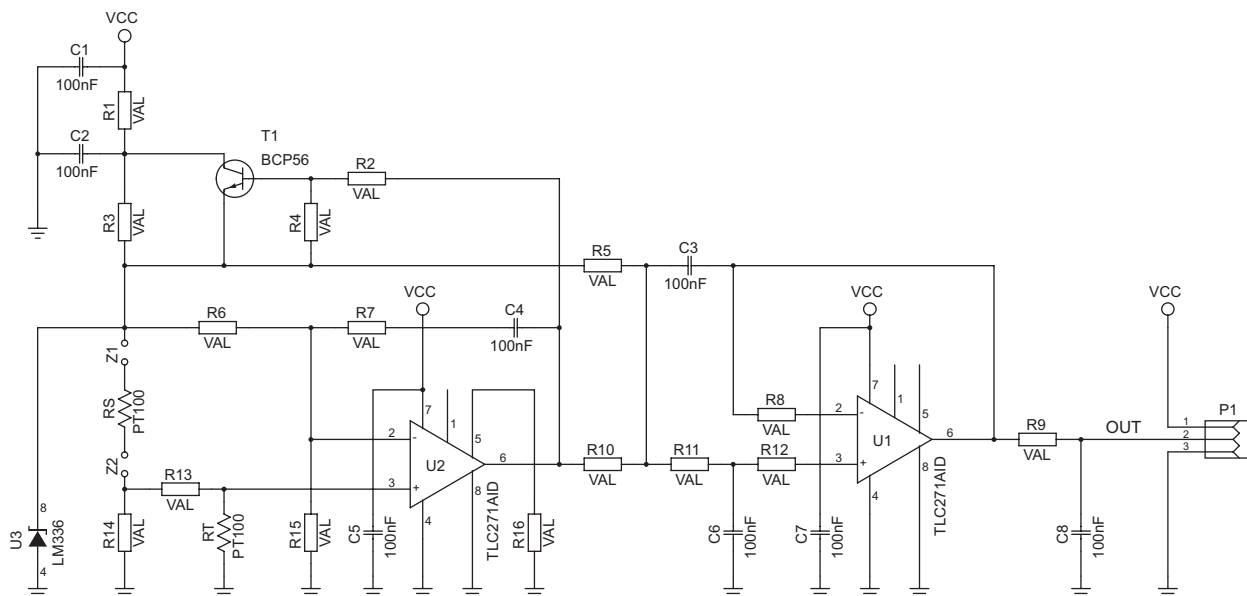
Kolejnym krokiem, znacznie poszerzającym obszar aplikacyjny systemu jest budowa potrójnych głowic zintegrowanych. Zasadniczy element toru pomiarowego stanowi czujnik, którego bazę pomiarową tworzy układ trzech wzajemnie prostopadłych miniaturowych, cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych. Czujnik ten umożliwia pomiar składowych wektora prędkości przepływu gazu.

3. Konstrukcja systemu pomiarowego

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

Schemat ideowy pojedynczego układu sondy pomiarowej przedstawiono na rys. 1.

W zależności od rodzaju elementów pomiarowych, obsadzenia i wartości poszczególnych elementów elektronicznych realizowane są różne warianty sondy. Możliwa jest realizacja układu stałoprądowego do



Rys. 1. Schemat ideowy pojedynczej zintegrowanej sondy termooanemometrycznej

pomiarów termometrycznych oraz układu stałotemperaturowego do pomiarów termooanemometrycznych [4]. Termooanemometr stałotemperaturowy pracuje w zmodyfikowanym układzie mostkowym z kompensacją temperatury. Po zastąpieniu elementów kompensacji temperaturowej rezystorami układ nie jest skompensowany. Jako elementy pomiarowe mogą zostać zastosowane czujniki platynowo-ceramiczne lub czujniki drutowe do pomiaru przepływów szybkozmiennych. Sonda symetryczna złożona z dwóch identycznych układów pozwala na detekcję zwrotu wektora prędkości.

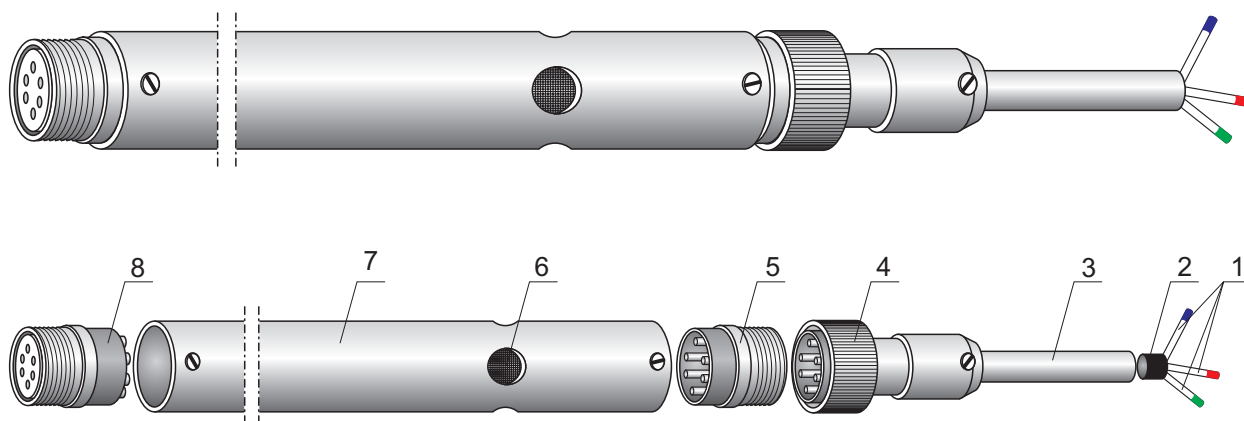
Sonda przeznaczona do wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu składa się z trzech termooanemometrów, które umożliwiają przetwarzanie sygnałów pomiarowych pochodzących z każdego z trzech elementów pomiarowych, którymi są specjalistyczne cylindryczne sensory platynowo-ceramiczne. W poprzednich wersjach głowicy czujnik był na stałe zintegrowany z układem termooanemometrycznym. Czujnik do wyznaczania składowych wektora prędkości stanowi część wymienną, jest osadzany w złączu kontaktowym głowicy.

3.1. Budowa i technologia wykonania czujnika pomiarowego

Bazę pomiarową czujnika do wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu tworzy układ trzech miniaturowych cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych ustawionych w przestrzeni w taki sposób, że ich osie podłużne tworzą naroże sześcianu, natomiast oś sondy jest jego przekątną. Kąt pomiędzy osią sensora a osią sondy wynosi 54.7° . Fot. 1 przedstawia prototyp czujnika przemysłowego do wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu.

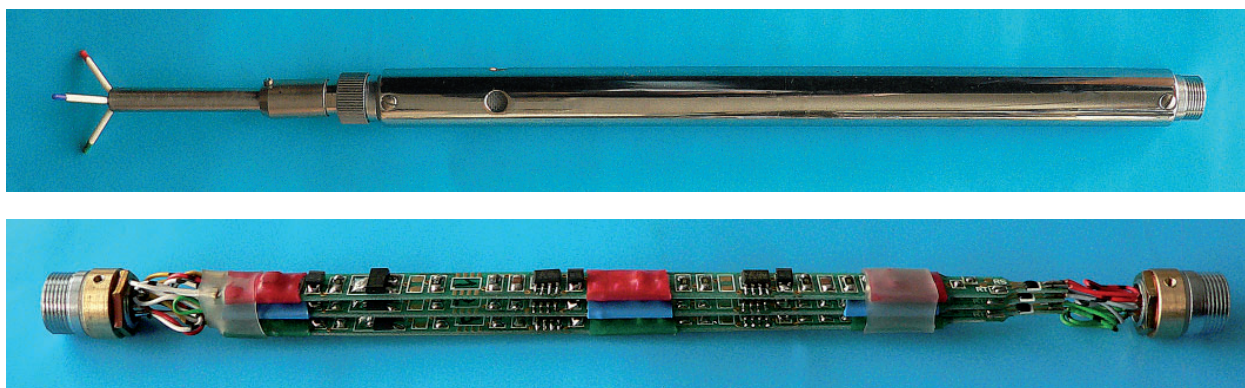


Fot. 1. Czujnik do wyznaczania składowych wektora prędkości w warunkach przemysłowych



Rys. 2. Schemat złożeniowy potrójnej głowicy zintegrowanej do wyznaczania składowych wektora prędkości

Opracowany czujnik (Fot. 1, Rys. 2) składa się z: trzech cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych – 1, izolatora, w którym zamocowano sensory, równocześnie izolującego elektrycznie elementy mierzące i stabilizującego ich przestrzenny układ – 2, rurki stalowej o średnicy zewnętrznej 6 mm – 3 oraz sześciostykowego, specjalistycznego złącza kontaktowego – 4. Złącze sondy ma swój odpowiednik w postaci gniazda w potrójnej głowicy termooanemometrycznej – 5. Czujnik jest połączony złączem z potrójnym układem termooanemometrycznym, którego osłonę stanowi korpus o średnicy 15 mm – 7, w poboczniczy nawiercone są otwory z siatkami zabezpieczającymi przed zanieczyszczeniem – 6, które umożliwiają swobodny dopływ medium do termometrów znajdujących się na trzech płytkach jednostronnie drukowanych i montowanych w technice SMT, tworzących potrójny system termooanemometryczny. Korpus sondy jest zakończony złączem kontaktowym – 8, do którego przyłączany jest przewód wyprowadzający sygnały napięciowe z poszczególnych elementów mierzących. Głowicę pomiarową z potrójnym czujnikiem oraz układ termooanemometryczny głowicy przedstawia Fot. 2.



Fot. 2. Sonda (głowica) zintegrowana do wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu

W pierwszym etapie wykonania wymiennego czujnika, cylindryczne sensory są umieszczane w izolatorze, w którym uprzednio nawiercono trzy pary otworków symetrycznie względem środka, parami co 120° . Ponieważ doprowadzenia sensora są bardzo cienkie należy je wstępnie umocować w izolatorze szybkowiążącym klejem. W dolnej części izolatora znajduje się komora, w której wykonuje się odizolowanie doprowadzeń sensorów za pomocą elastycznego kleju silikonowego. Następnie cienkie i elastyczne kabelki w trzech kolorach łączy się odpowiednio z parami doprowadzeń poszczególnych sensorów.

Kolejny krok polega na wklejeniu izolatora do stalowej rurki korpusu. Po wklejeniu, wystające końce przewodów lutuje się odpowiednio z poszczególnymi stykami złącza. Konieczna jest w trakcie tych czynności duża precyzja i ostrożność, aby nie uszkodzić delikatnych doprowadzeń sensorów. Po złożeniu

wszystkich elementów korpusu ustawia się przestrzenną konfigurację elementów mierzących za pomocą specjalnego wzorca. Odpowiednio ustawione sensory stabilizuje się na zewnętrznej powierzchni izolatora za pomocą kleju.

Zmontowany czujnik należy przechowywać tak, by nie uszkodzić elementów mierzących i nie zmienić ich przestrzennej orientacji.

Termoanemometryczna sonda zintegrowana do wyznaczania składowych wektora prędkości posiada następujące parametry techniczne:

- współczynnik nagrzania – 1.2
- zakres mierzonych prędkości – $0 \div 10$ m/s
- zakres temperatury – $0 \div 60$ °C
- napięcie wyjściowe – $0 \div 10$ V
- napięcie zasilania – 12 V
- masa – 270 g

3.2. Termoanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu

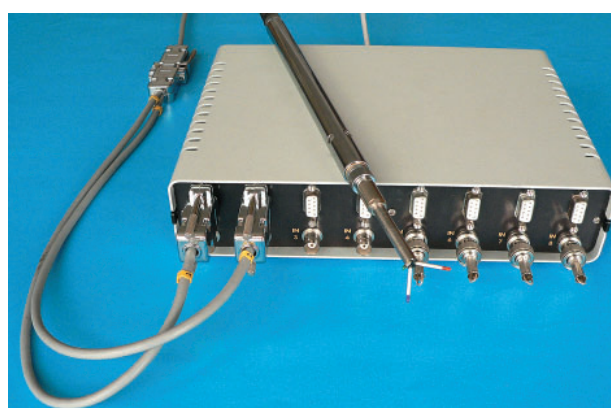
W skład systemu pomiarowego wchodzi sonda termoanemometryczna zintegrowana z układem przetwarzania sygnału oraz układ akwizycji danych pomiarowych z poszczególnych sond. Układ akwizycji danych pracuje w oparciu o wielofunkcyjny moduł DAQ na USB typ: NI USB-6009 firmy National Instruments o następujących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

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

Istnieje możliwość zastosowania dwóch modułów w celu zwiększenia ilości kanałów pomiarowych. Moduły współpracują z notebookiem Toshiba Satellite L10 – 118. System pomiarowy posiada autonomiczne zasilanie i jest w pełni mobilny. Rozmieszczenie sond pomiarowych w wybranych punktach badanego pola prędkości, a następnie rejestracja i przetwarzanie sygnałów z poszczególnych sond umożliwia wyznaczenie składowych wektora prędkości przepływu, wielopunktowy i współczesowy pomiar pola temperatury i prędkości oraz intensywności turbulencji, a także wyznaczenie strumienia objętościowego. Na Fot. 3 i Fot. 4 przedstawiono termoanemometryczny system pomiaru wektora prędkości przepływu.



Fot. 3. Termoanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu



Fot. 4. Termoanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu

4. Wzorcowanie sondy do wyznaczania składowych wektora prędkości

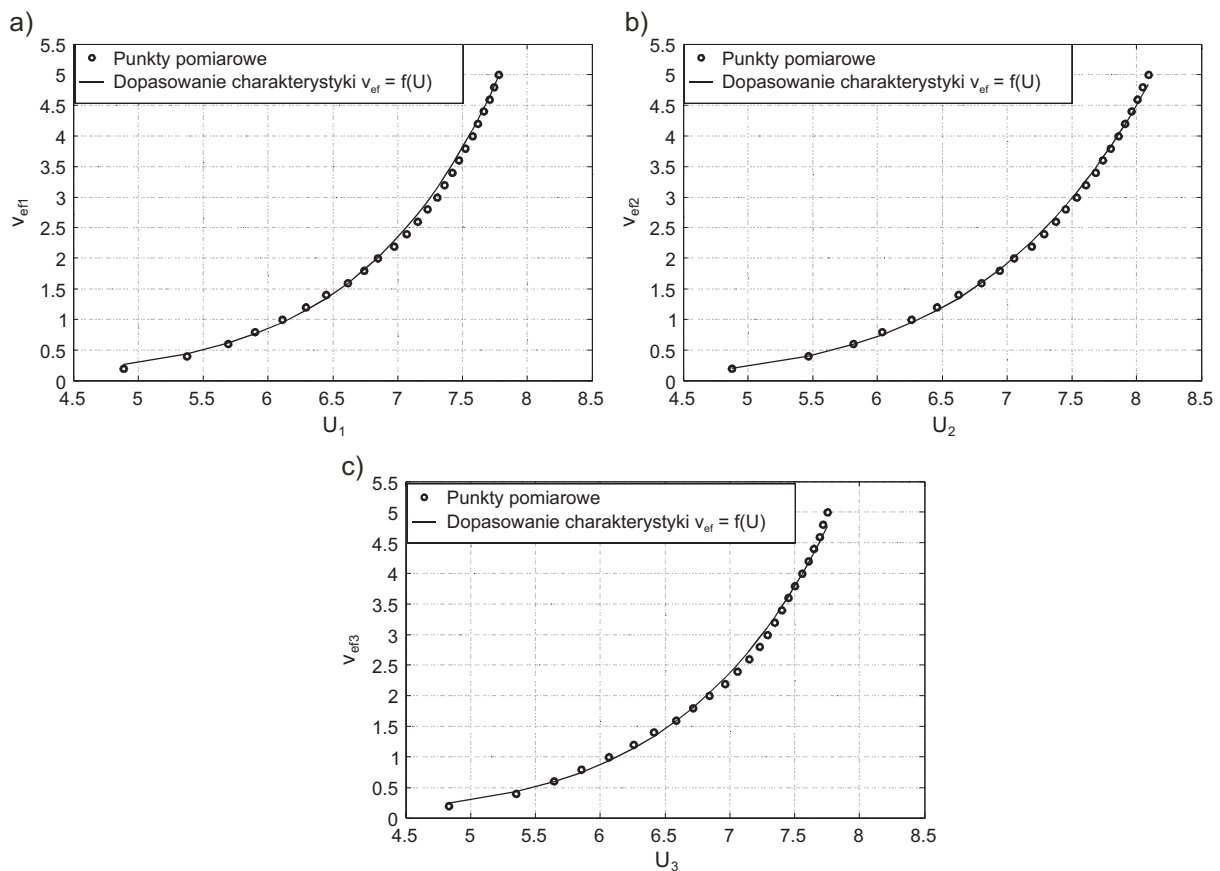
Wzorcowanie i badania właściwości metrologicznych zintegrowanych głowic pomiarowych do wyznaczania wektora prędkości przepływu przeprowadzono na uniwersalnym stanowisku pomiarowym, którego szczegółowy opis zawarty jest np. w pracy [6].

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 prostokątnym ustawieniu dwóch pozostałych. Ponieważ każdy z elementów mierzonych 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 prostokątnym na element mierzący dopasowywana jest zależność (1). Przyjmuje się, że przy napływie prostokątnym 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. 3. 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. 3. Dopasowanie zależności (1) do danych pomiarowych dla poszczególnych elementów sondy

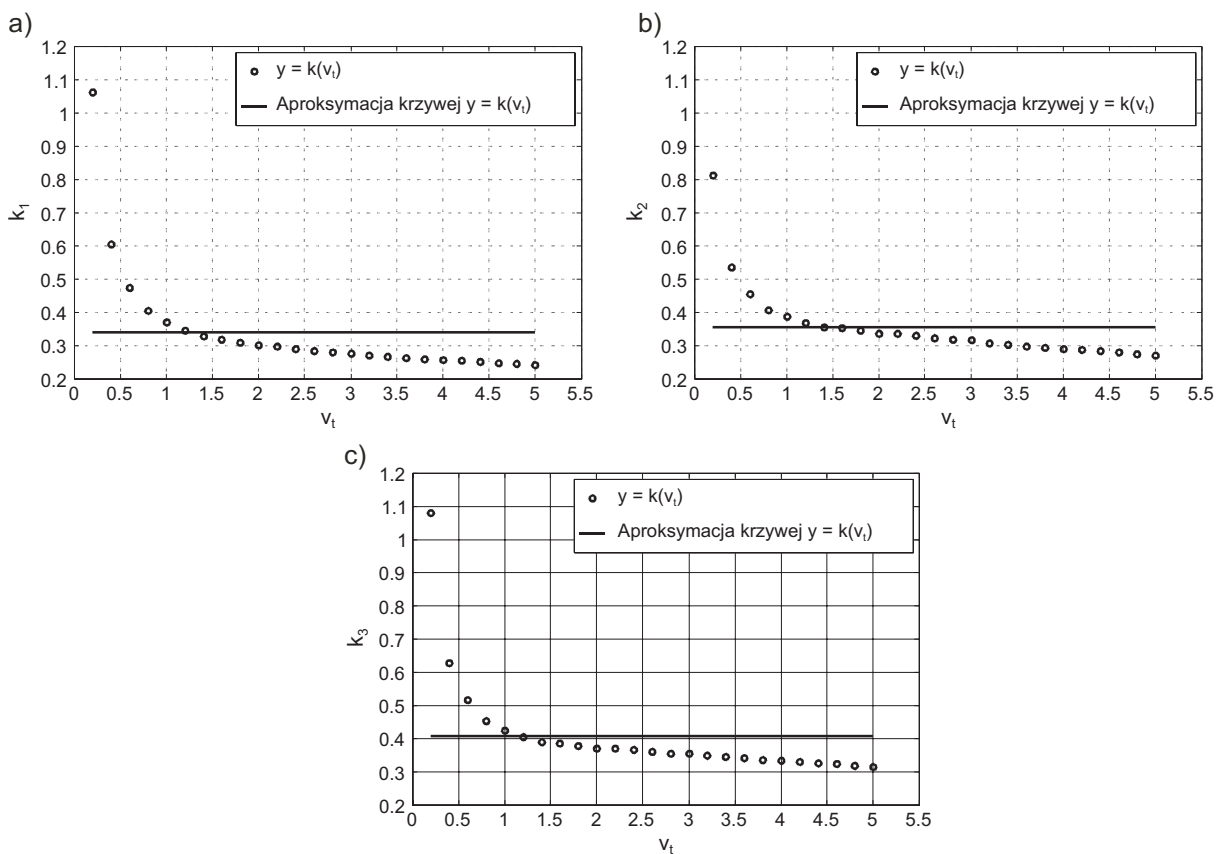
Natomiast w drugim etapie wyznaczane są współczynniki k_i potrzebne do przeliczenia prędkości efektywnej dla poszczególnych elementów na składowe prędkości przepływu według zależności (2).

$$v^2 = K^{-1} \cdot v_{ef}^2 \tag{2}$$

gdzie:

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

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. 4).



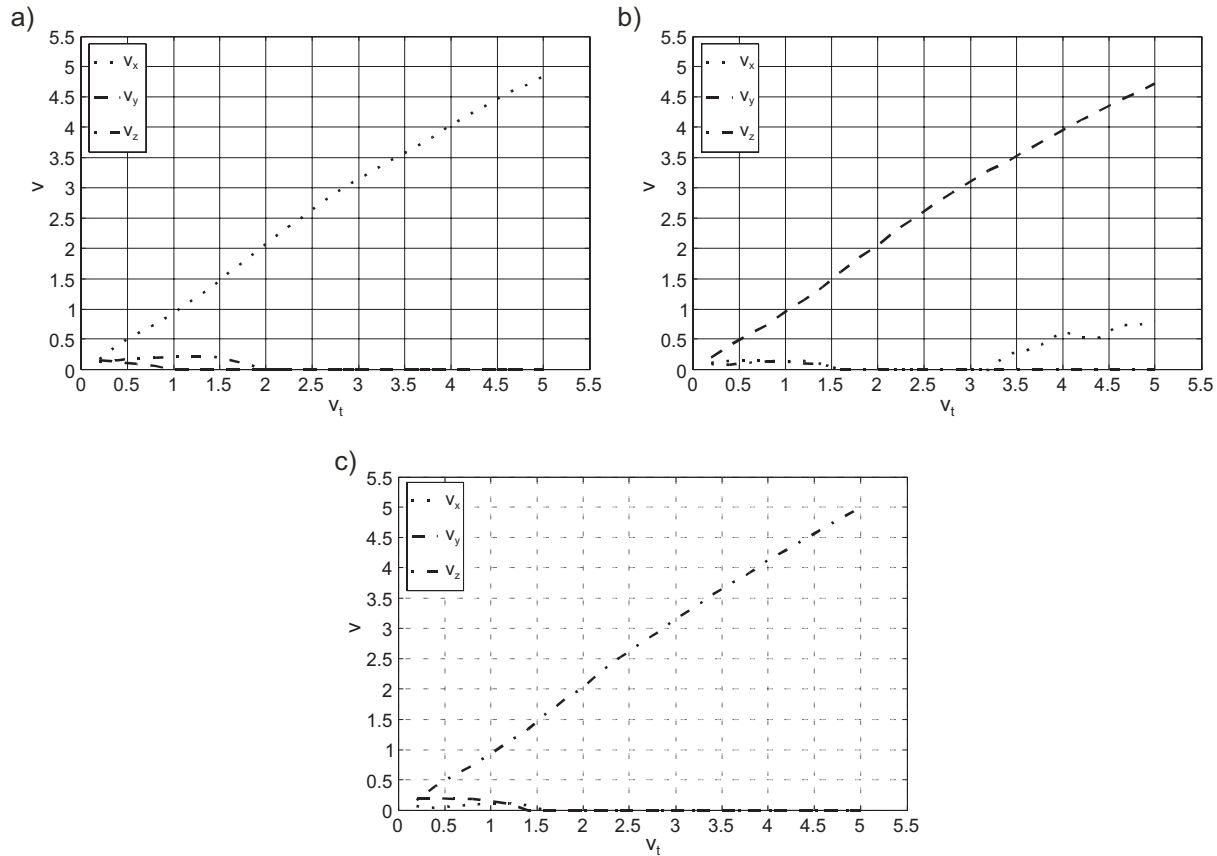
Rys. 4. Aproksymacja zależności $k(v_t)$ dla poszczególnych elementów sondy

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 odchylek 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. 5. przedstawiono rozkład wektora prędkości na składowe dla trzech ustawień sondy podczas wzorcowania, tzn. gdy każdy z trzech elementów mierzących był zorientowany równoległe do przepływu, a dwa pozostałe prostopadłe.



Rys. 5. Rozkład wektora na składowe w przypadku, gdy równoległe do przepływu ustawiony jest element:
a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci

Na Rys. 5. przedstawiono błąd względny obliczonego modułu wektora prędkości i prędkości zadawanej w tunelu aerodynamicznym, dla przypadków pokazanych na Rys. 4. Błąd względny został wyznaczony z następującej zależności:

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

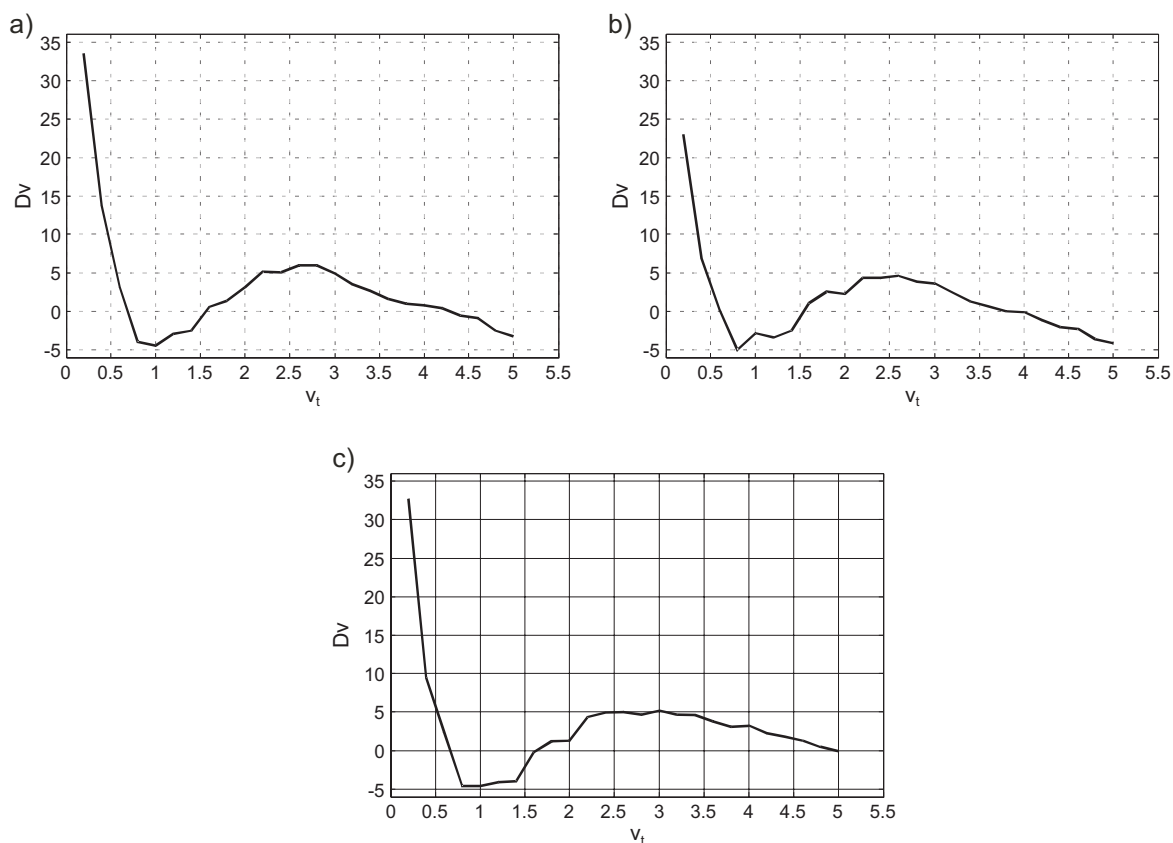
gdzie:

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

4.1. 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. 7. przedstawiono dopasowanie zależności (1) do danych pomiarowych. Natomiast Rys. 8. prezentuje aproksymacje zależności $k(v_t)$ dla poszczególnych elementów mierzących.

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



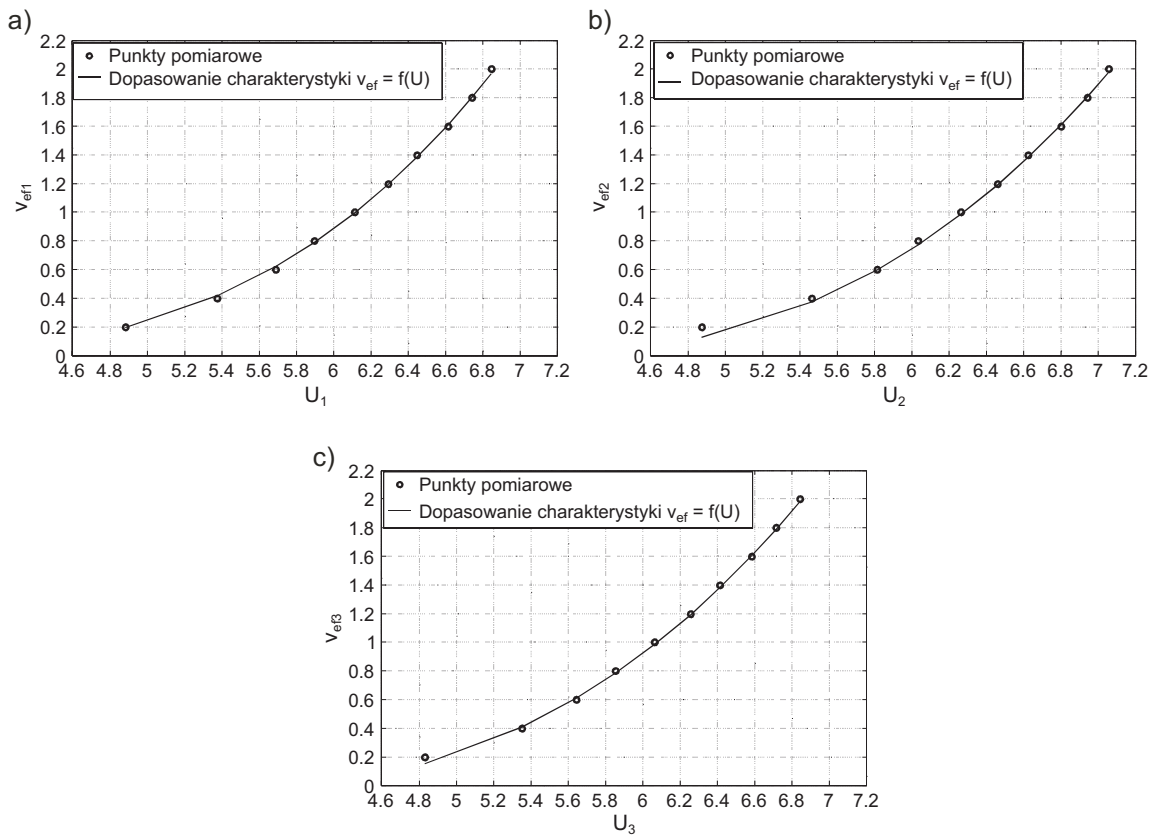
Rys. 6. Błąd względny dla modułu prędkości w przypadku, gdy równoległe do kierunku przepływu ustawiony jest element: a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci

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

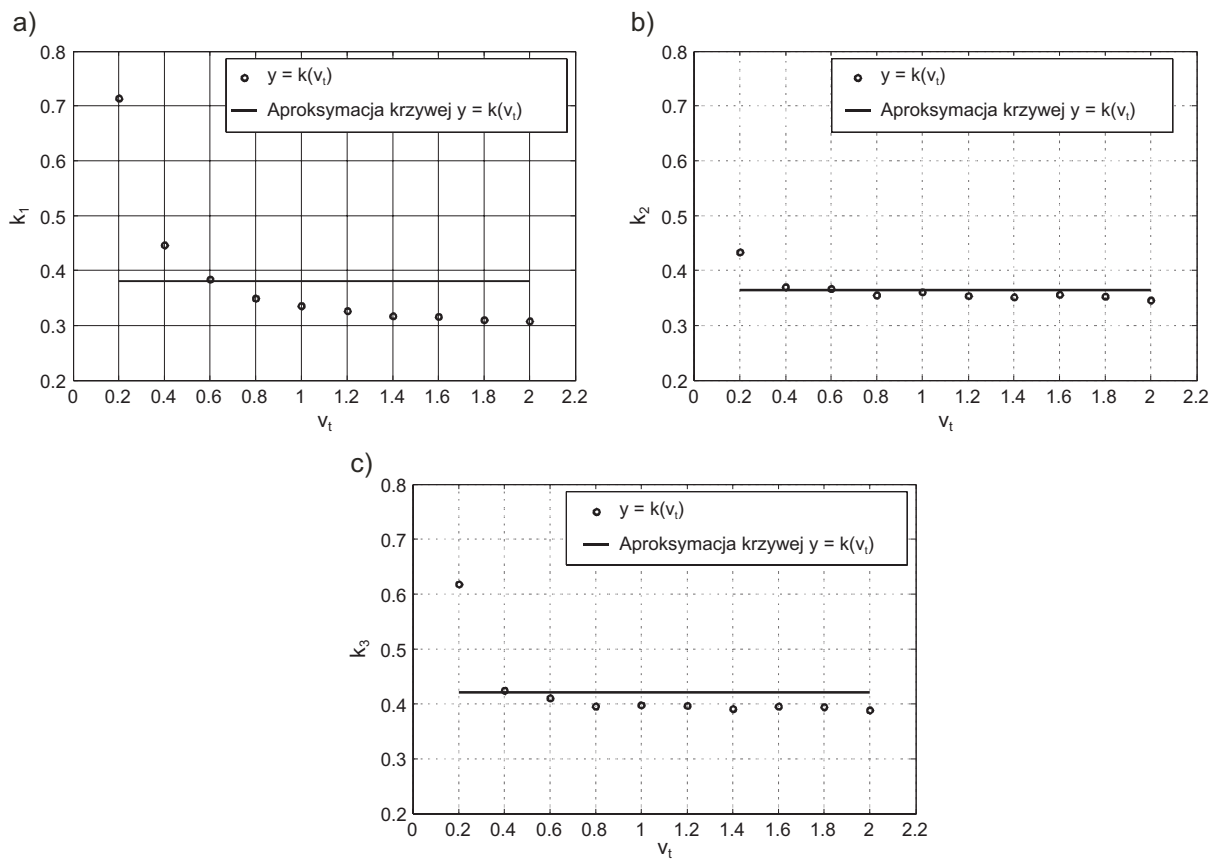
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>n</i>	<i>k</i>
1	11.773	25.643	2.163	0.381
2	16.056	23.361	1.861	0.365
3	16.225	20.712	1.755	0.421

Rozkład wektora prędkości przepływu dla ustawień sondy z wzorcowania przedstawiono na Rys. 9, natomiast błąd względny na Rys. 10.

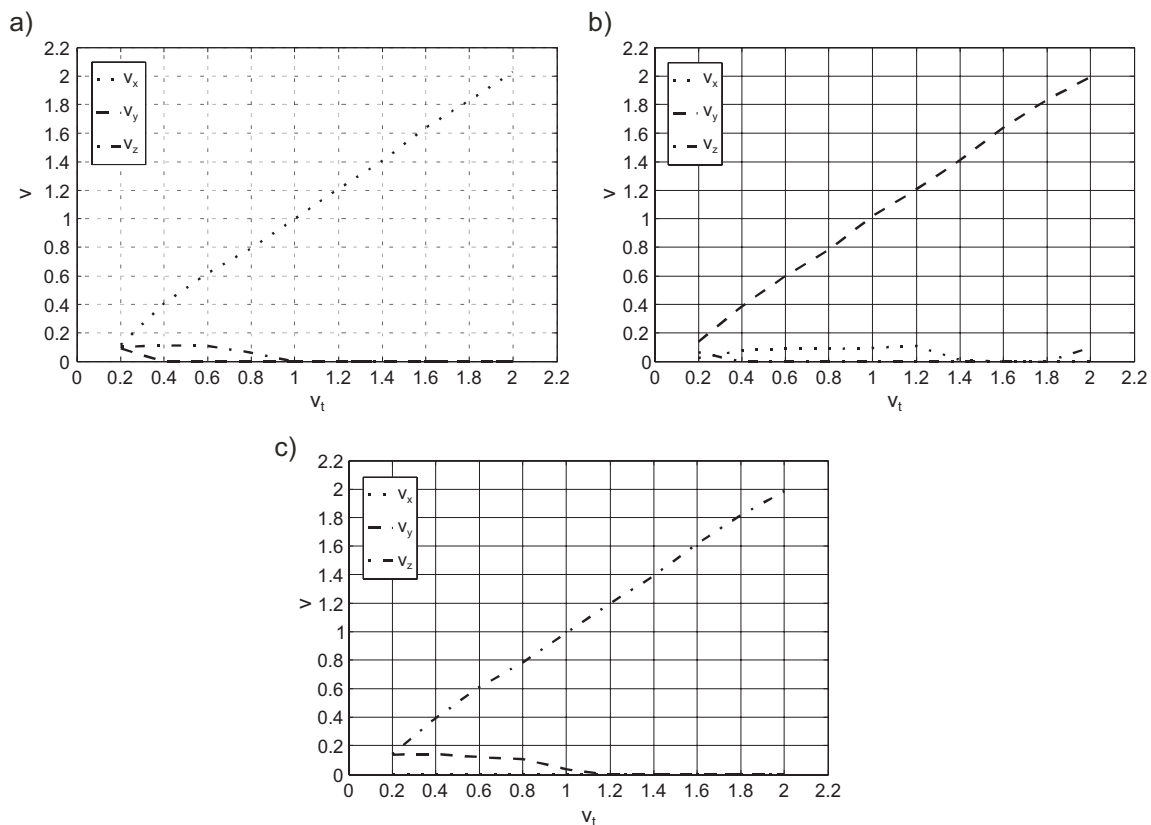
Zastosowana metoda wzorcowania potrójnej sondy do wyznaczania wektora prędkości przepływu została opisana szeroko w pracy [6]. Modyfikację stanowi uproszczenie procedury, które polega na wprowadzeniu aproksymacji zależności współczynnika k od prędkości zadanej v_t wartością stałą.



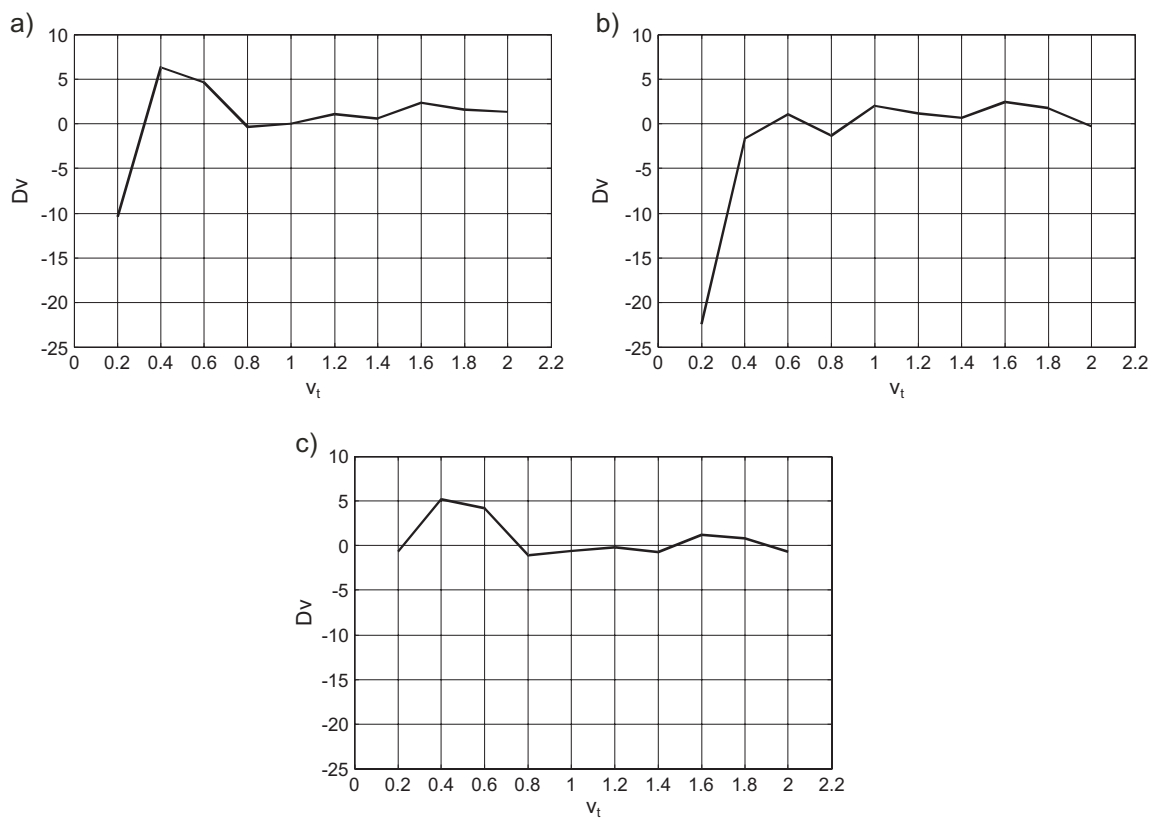
Rys. 7. Dopasowanie zależności (1) do danych pomiarowych dla poszczególnych elementów sondy w zakresie małych prędkości przepływu



Rys. 8. Aproksymacja zależności $k(v_i)$ dla poszczególnych elementów sondy w zakresie małych prędkości przepływu



Rys. 9. Rozkład wektora prędkości w przypadku, gdy równoległe do przepływu ustawiony jest element: a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci



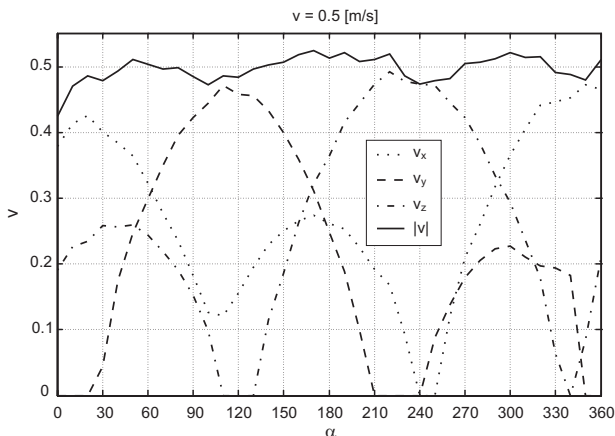
Rys. 10. Błąd względny dla modułu prędkości w przypadku, gdy równoległe do przepływu ustawiony jest element: a) pierwszy, b) drugi, c) trzeci

5. Wyznaczanie składowych i modułu wektora prędkości

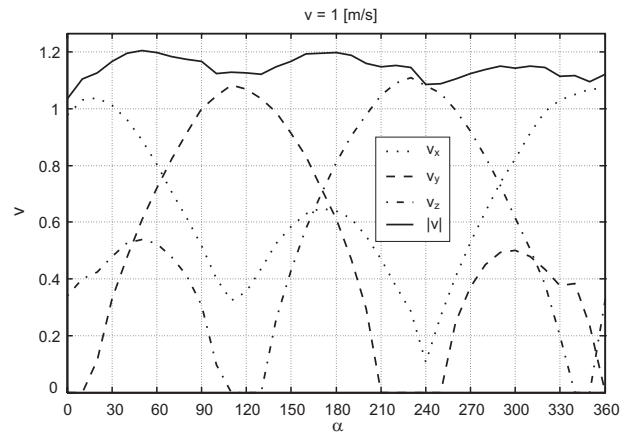
Po wywzorcowaniu trójelementowej sondy do wyznaczania wektora prędkości przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych testy pomiarowe w zakresie prędkości od 0 do 5 m/s. Między innymi wykonano charakterystyki kątowe sondy dla różnych kątów napływu medium na elementy mierzące sondy.

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 położeń sondy, rejestrowane były sygnały napięciowe z każdego z trzech elementów mierzących, na podstawie których, zostały wyznaczone składowe i moduł wektora prędkości przepływu.

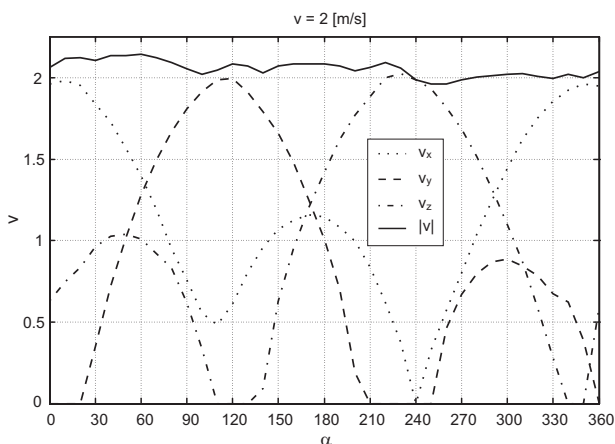
Prezentowane poniżej wyniki dotyczą pomiarów charakterystyk kątowych wykonanych w dwóch charakterystycznych położeniach osi sondy względem napływającego medium. Zarejestrowano charakterystyki kątowe w ustawieniu, kiedy kąt pomiędzy osią sondy a wektorem prędkości wynosi ok. 54.7° (pozycja, w której sonda jest wzorcowana) czyli układ wyjściowy obrotu sondy charakteryzujący się równoległością jednego elementu i prostopadłością 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 11, 12, 13, 14, 15, 16 przedstawiono charakterystyki kątowe sondy przy zadanej prędkości z zakresu od 0 do 5 m/s i kącie napływu 54.7° .



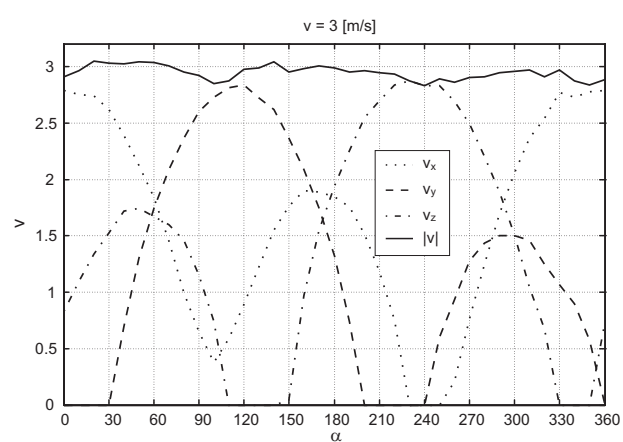
Rys. 11. Charakterystyka kąтовая potrójnej sondy, $v = 0.5$ m/s, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$



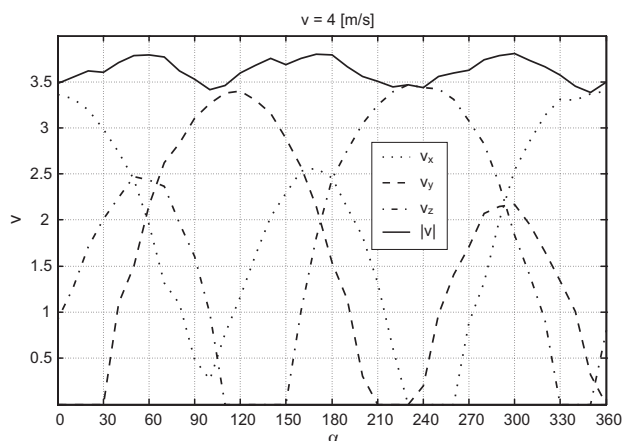
Rys. 12. Charakterystyka kąтовая potrójnej sondy, $v = 1.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$



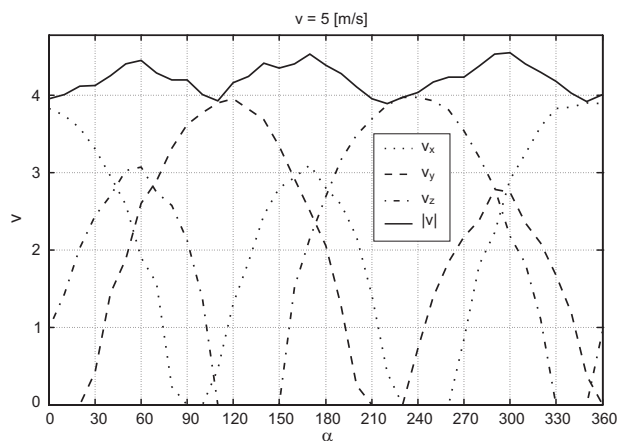
Rys. 13. Charakterystyka kąтовая potrójnej sondy, $v = 2.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$



Rys. 14. Charakterystyka kąтовая potrójnej sondy, $v = 3.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$

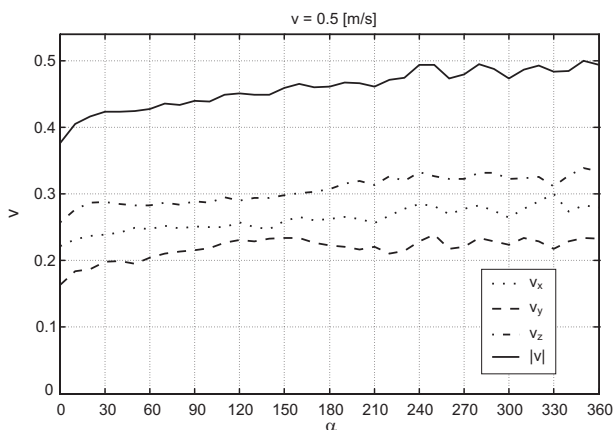


Rys. 15. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 4.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$

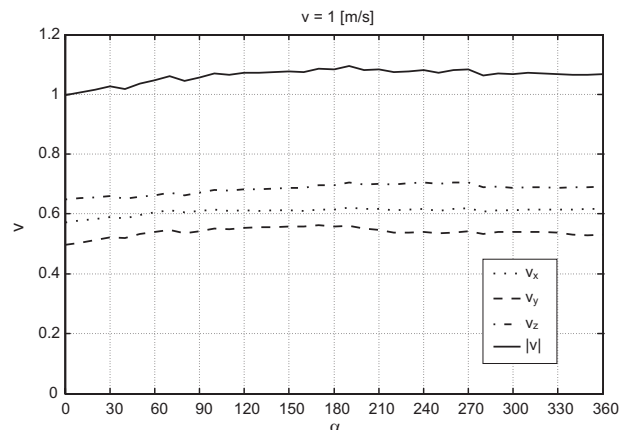


Rys. 16. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 5.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 54.7^\circ$

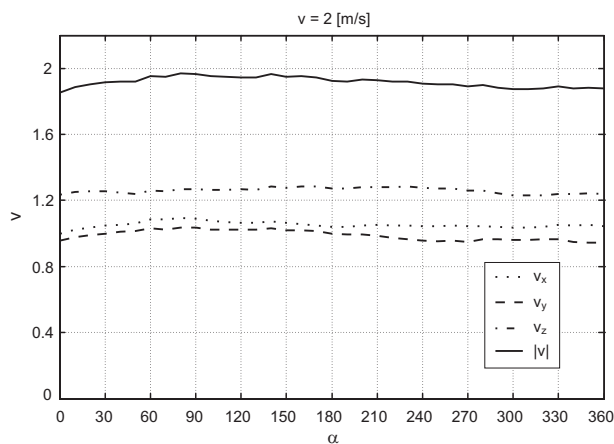
Na kolejnych rysunkach 17, 18, 19, 20, 21, 22 przedstawiono charakterystyki kątowne sondy w ustawieniu charakteryzującym się równoległością osi sondy do kierunku wektora prędkości przepływu.



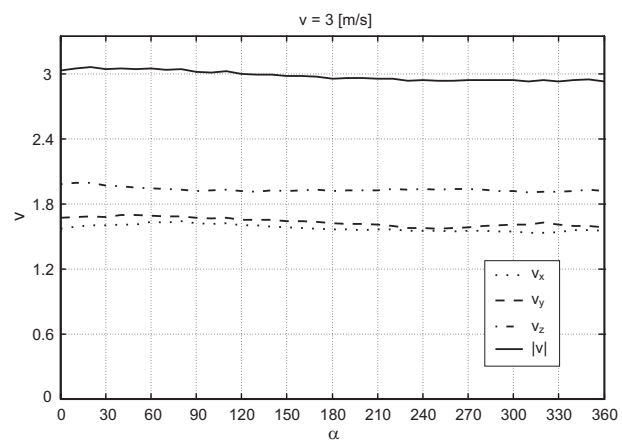
Rys. 17. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 0.5 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 0^\circ$



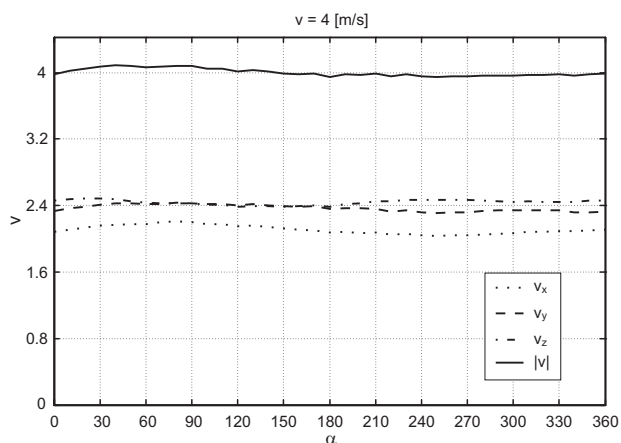
Rys. 18. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 1.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 0^\circ$



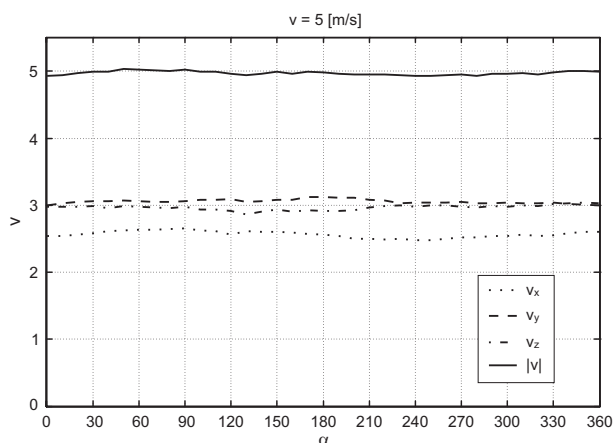
Rys. 19. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 2.0 \text{ m/s}$, kąt napływu $\beta = 0^\circ$



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



Rys. 21. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 4.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 0^\circ$



Rys. 22. Charakterystyka kątowna potrójnej sondy, $v = 5.0$ m/s, kąt napływu $\beta = 0^\circ$

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 termooanemometrycznej, 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 dalsze optymalizowanie metody pomiarowej i budowy sondy wieloelementowej.

6. Podsumowanie

W Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN został zaprojektowany i skonstruowany hybrydowy termooanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu w warunkach specjalnych np. w wyrobisku górniczym. Jest on połączeniem termooanemometrycznego systemu pomiaru parametrów przepływu opartego na integracji układu przetwarzania sygnału pomiarowego i elementu mierzącego [7, 8], stosowanego z powodzeniem do pomiarów w wyrobisku górniczym i termooanemometrycznej metody wyznaczania wektora prędkości przy pomocy trójwłóknowej sondy anemometrycznej do zastosowań laboratoryjnych.

System jest przystosowany do specyficznych warunków pracy w kopalni (przepływ nieustalony i nieizotermiczny, o znacznym stopniu zanieczyszczenia i wilgotności). Termooanemometryczny system pomiarowy do wyznaczania składowych wektora prędkości jest oparty na trójelementowych czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Głowica zintegrowana składająca się z trójelementowej sondy i trójukładowego systemu przetwarzania danych współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych. System jest w całości przenośny.

Zintegrowana głowica termooanemometryczna do wyznaczania wektora prędkości stanowi rozwinięcie systemu wielopunktowych i współczesnych pomiarów pola prędkości i temperatury. Jako pierwszy element w torze pomiarowym zastosowano nową konstrukcję czujnika trójelementowego, którego bazę pomiarową tworzą trzy, wzajemnie prostopadłe cylindryczne sensory platynowo-ceramiczne. Sonda ze względu na swoją budowę nadaje się do długotrwałych pomiarów. Ze względu na rozmiary elementów mierzących ich stała czasowa jest rzędu kilku sekund. Istnieje jednak możliwość zastosowania sensorów, których średnica jest

o połowę mniejsza. Niestety, tego typu elementy nie są dostępne na rynku krajowym. Jeśli uda się zakupić tego rodzaju miniaturowe sensory, parametr stałej czasowej ulegnie zmniejszeniu i zaistnieje możliwość pomiarów szybszych fluktuacji przepływu. Szczególnie należy podkreślić wyjątkowe właściwości sondy pozwalające na pomiary małych prędkości przepływu.

Przeprowadzone testy laboratoryjne pozwoliły na zbadanie właściwości metrologicznych sondy i wskazały na konieczność dalszej optymalizacji konstrukcji. Uzyskane wyniki wyznaczonych składowych i modułu wektora prędkości w większości wykazują zadowalającą dokładność na etapie badań wstępnych prototypu konstrukcji. Czujnik pomiarowy zbudowany z cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych nie wymaga konstrukcji nośnej w postaci wsporników, do których montowano cienkie włókna anemometryczne. Dzięki temu wyeliminowano zakłócenia obszaru pomiarowego, powodowane przez wsporniki, a także problem przesłaniania włókien przez elementy konstrukcji nośnej.

Skonstruowanie hybrydowego termoanemometrycznego systemu wyznaczania składowych i modułu wektora prędkości przepływu poszerzy znacznie obszar aplikacyjny aparatury pomiarowej opartej na metodach anemometrii cieplnej. Dzięki przystosowaniu systemu do trudnych warunków pomiarowych, może on być przydatny w wielu zagadnieniach metrologicznych związanych z wentylacją przemysłową.

Pracę wykonano w ramach pracy statutowej realizowanej w IMG PAN Kraków w roku 2007, finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Roszczyniański W., Trutwin W., Waclawik J.: *Kopalniane pomiary wentylacyjne*; Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1992.
- [2] 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 Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2007.
- [3] Ligęza P.: *Integracja czujnika termoanemometrycznego z układem pomiarowym*; Materiały IV Konferencji COE, Szczyrk 1996.
- [4] Ligęza P.: *A modified temperature – compensation circuit for CTA*; Meas. Sci. Technol., 3, 1998.
- [5] Ligęza P.: *Układy termoanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*; Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie nr 98, Kraków 2001.
- [6] Poleszczyk E.: *Termoanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości*; Monografie Rozprawy, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2002.
- [7] Ligęza P., Poleszczyk E.: *Multi-points measurements of gas flow velocity fields*; Arch. Min. Sci., Vol 50 (2005), No 4, p. 417-447.
- [8] Ligęza P., Poleszczyk E.: *Zintegrowana sonda do wielopunktowych, współczesnych pomiarów pól temperatury i prędkości przepływu gazu*; Prace Instytutu Mechaniki Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2005.

Hybrid anemometer system for air flow velocity vector components measurement in mine working

Abstract

This article presents the hybrid anemometer system for measurement of air flow velocity vector components in a special conditions e.g. in mining industry. Hybrid triple-element probe consists of three, miniature platinum sensors in cylindrical ceramic case each. These sensors are mutually perpendicular and form three edges of a cube. Results of probe calibration as well as results of measurements of flow velocity vector components were presented.

Keywords: hybrid anemometer measuring system, integrated probe, flow velocity vector

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