

Pomiary strumienia objętości przepływu w aspekcie dynamiki anemometrycznych czujników pomiarowych

JAKUB JANUS, JERZY KRAWCZYK, JANUSZ KRUCZKOWSKI

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

Streszczenie

Prowadzono badania porównawcze anemometrów skrzydełkowych oraz dwóch rodzajów czujników termooanemometrycznych do pomiaru wektora prędkości; drutowych i z termistorami PT100. Pomiary realizowano w tunelu aerodynamicznym i wyrobiskach kopalni – chodniku i kanale ściany. W warunkach laboratoryjnych było możliwe wzorcowanie czujników bezpośrednio przed i po porównaniach. Daje to podstawę do ilościowych porównań. W warunkach kopalnianych nie było możliwości wzorcowania czujników, co zwiększało niepewność pomiaru termooanemometrami, które cechuje znaczna wrażliwość wskazań na warunki środowiskowe. Rejestracje stanów przejściowych ukazały znaną z literatury wolniejszą reakcję anemometrów skrzydełkowych na spadek prędkości niż na jej wzrost. Pomiary laboratoryjne nie wykazały jednak znaczącej tendencji anemometrów skrzydełkowych do zawyżania wskazań wskutek fluktuacji prędkości. Pomiary w kopalni dostarczyły informacji o poziomie fluktuacji przepływu, co pozwala na przybliżone oszacowanie składowej niepewności pomiaru związanej z fluktuacjami przepływu. Przeprowadzono walidację systemu wielopunktowego pomiaru pola prędkości, umożliwiającego wyznaczanie strumienia objętości przepływającego powietrza. System został zamontowany w komorze tunelu aerodynamicznego, a następnie porównano wyniki pomiarów odnosząc je do wielkości strumienia przepływającego przez komorę pomiarową tunelu. Czujniki systemu były zlokalizowane w bliskiej odległości do prostownicy strumienia znajdującej się na wlocie do tunelu, a więc w obszarze w którym można spodziewać się występowania fluktuacji powietrza. W celu uzyskania nowych możliwości badań w środowisku kopalni głębinowej, skonstruowany został czujnik termooanemometryczny wykorzystujący równoległe elementy PT100, umożliwiający pomiar wektora prędkości w płaszczyźnie.

Słowa kluczowe: fluktuacje prędkości powietrza, anemometr skrzydełkowy, termooanemometr, wielopunktowy pomiar pola prędkości powietrza, strumień objętości, wentylacja kopalń

1. Wprowadzenie

Niektóre doświadczenia i analiza teoretyczna wskazywały na wrażliwość anemometrów skrzydełkowych na fluktuacje przepływu (Wasilewski, 1996). Powodowałoby to zawyżanie ich wskazań w stopniu zależnym od intensywności turbulencji (Kruczkowski, 1999; Chmiel i Kruczkowski, 2005).

Wpływ fluktuacji przepływu na odczyt anemometrów reprezentuje odpowiednia składowa niepewności pomiaru. Dla jej określenia powinniśmy znać rzeczywisty przebieg prędkości.

W warunkach laboratoryjnych możemy wymusić ruch czujnika. W szczególności można wymusić ruch posuwisto-zwrotny czujnika umieszczonego w stacjonarnym przepływie o znanych; prędkości i charakterystyce turbulencji (Kruczkowski, 1999). Dla ustalenia związków między zmianami prędkości, a odczytami czujnika, turbulencja ta powinna być jak najbardziej zredukowana.

Obecnie trwają prace przygotowawcze do realizacji takich eksperymentów w tunelu aerodynamicznym IMG-PAN. W ich wyniku będzie można nie tylko porównać dynamiczne właściwości różnych czujników prędkości, ale zweryfikować istniejące i nowe modele zachowań czujników prędkości w stanach niestacjonarnych. Jednak wytworzony w ten sposób niestacjonarny przepływ będzie inny niż w wyrobiskach kopalnianych.

W warunkach polowych rzeczywisty przebieg prędkości można oceniać stosując dokładniejsze metody pomiarowe. Z tego względu podjęto próbę zastosowania termooanemometrów jako przyrządów odniesienia.

Wśród zalet termooanemometrów możemy wymienić:

- mniejszą stałą czasową – lepsza zdolność do pomiaru składowej fluktuacyjnej przepływu,
- możliwość pomiaru wektora prędkości (ograniczenie – brak detekcji zwrotu) (Socha, 2009).

Wady to:

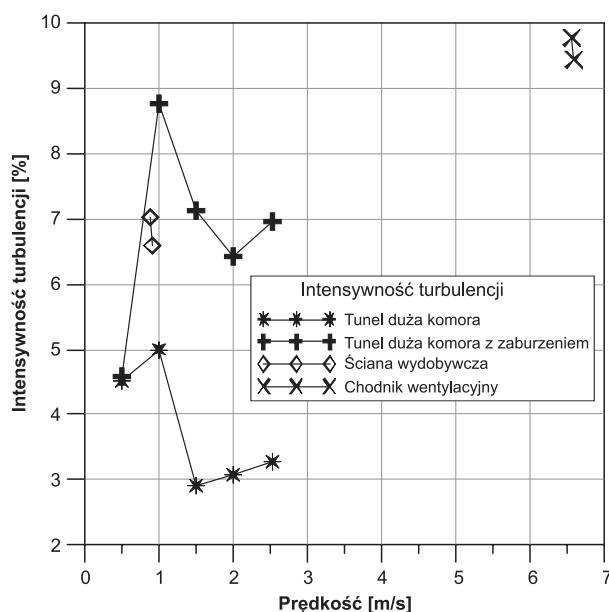
- silna wrażliwość odczytów na temperaturę,
- wrażliwość na skrajne warunki środowiskowe – obecność kropeł wody w powietrzu, silne zapylenie,
- obecność rozgrzanych elementów (druty lub czujniki termistorowe), co podnosi zagrożenie pożarem lub wybuchem.

Pomiar termooanemometrami pozwoli lepiej estymować charakterystyki turbulencji (intensywności i izotropowości) w wyrobiskach kopalnianych. Dane te zostaną wykorzystane bezpośrednio do szacowania niepewności pomiarów anemometrami skrzydełkowymi, oraz mogą być użyte do prognozowania wpływu niestacjonarnych składowych przepływu na zachowanie czujników w oparciu o odpowiednie modele matematyczne.

Dodatkowo, zmierzone parametry turbulencji będą bardzo przydatne dla symulacji przepływu metodami numerycznej mechaniki płynów. W szczególności posłużą do zadawania realistycznych warunków brzegowych i weryfikacji otrzymanych rozwiązań.

Jak stwierdzono wyżej, warunki środowiskowe praktycznie eliminują czujniki termooanemometryczne z zastosowania podczas ruchowych pomiarów w wyrobiskach kopalnianych. Znacznie mniej wrażliwe od nich są czujniki skrzydełkowe. Z tego powodu takie właśnie czujniki zastosowano w opracowanym w IMG PAN systemie do pomiaru pola prędkości (Krach i in., 2006). System ten nie jest przeznaczony do stacjonarnego instalowania w wyrobisku kopalni, może jednak pełnić rolę urządzenia badawczo – pomiarowego. Algorytmy zaimplementowane w programach obsługujących system, umożliwiają między innymi wyznaczanie strumienia objętości. Badanie dynamiki czujników skrzydełkowych pozwala na ewentualne korekty algorytmów systemu pod kątem zmniejszania niepewności pomiaru strumienia objętości. Bardzo istotnym zagadnieniem jest walidowanie systemu przez porównanie wyników jego obliczeń z wynikami uzyskanymi innymi metodami. Jest to zagadnienie trudne ze względu na rozmiary systemu, a także ze względu na pożądane duże wartości wielkości strumienia.

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki pomiarów prędkości przepływu powietrza wykonanych zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w wyrobiskach kopalń. Zakres prędkości i intensywności turbulencji badanych przepływów pokazano na Rys. 1.



Rys. 1. Intensywności turbulencji zmierzone termooanemometrami trójwłóknowymi z czujnikami drutowymi

2. Pomiary prędkości w dużej komorze tunelu aerodynamicznego

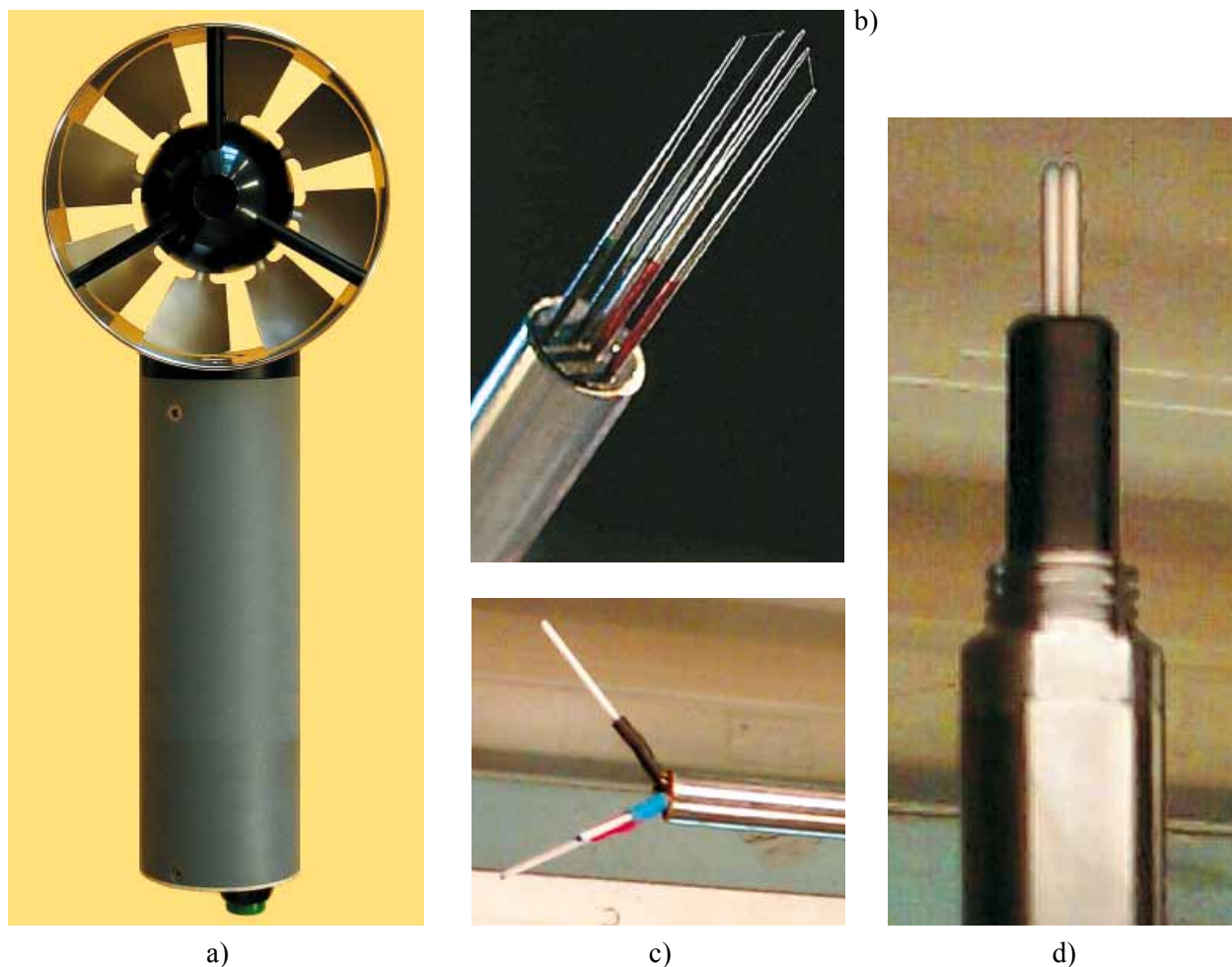
Przed przeprowadzeniem badań porównawczych w wyrobiskach kopalnianych należało określić charakterystyki czujników prędkości. W tym celu wykorzystano akredytowane laboratorium Instytutu, realizując zgodnie z procedurami wzorcowanie przyrządów w tunelu aerodynamicznym. W wyniku otrzymano charakterystyki o znanej niepewności.

Wykorzystano również dużą komorę tunelu do badań porównawczych opisanych w rozdziałach 2.3 i 5.

2.1. Charakterystyki sond pomiarowych

W badaniach porównawczych wykorzystano cztery rodzaje sond do pomiaru prędkości, przedstawione na Rys. 2. Były to:

- sondy anemometrów skrzydełkowych z systemu wielopunktowego pomiaru prędkości o średnicy głowicy pomiarowej 100 mm,
- termoanemometr z sondą trójwłóknową,
- termoanemometr z trzema prostopadłymi elementami PT100,
- termoanemometr z trzema równoległymi elementami PT100.



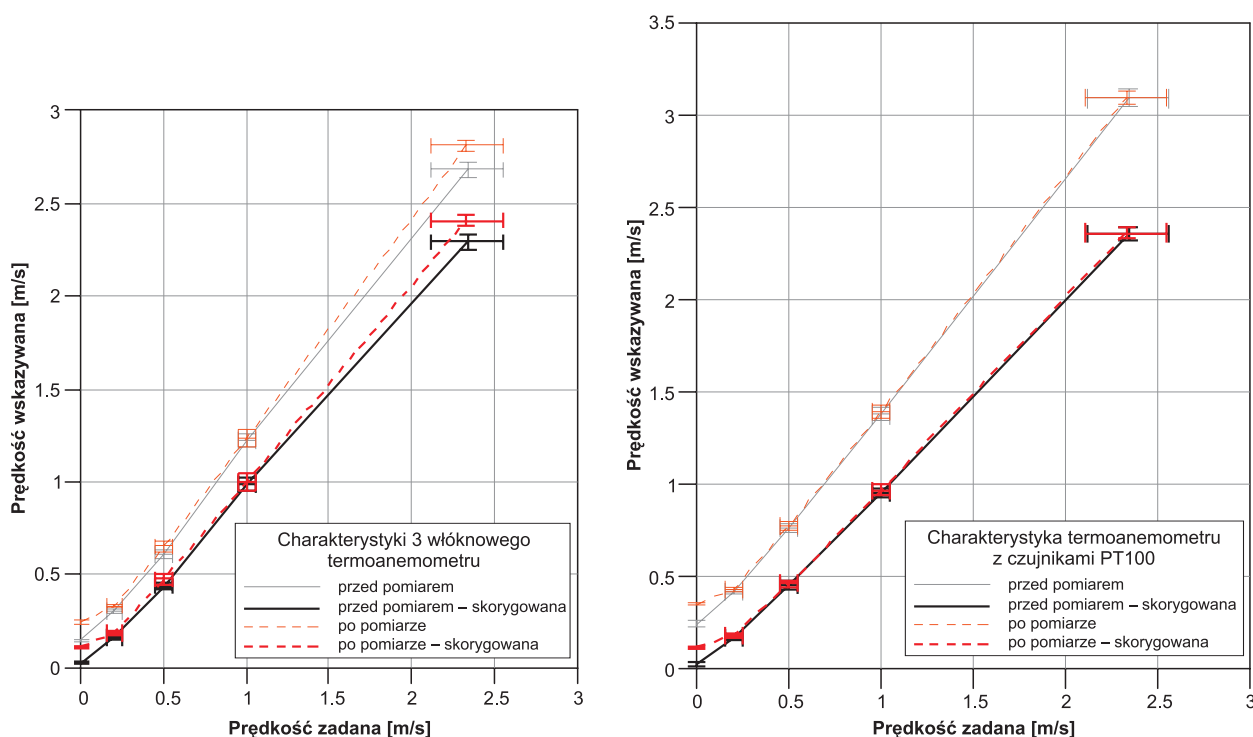
Rys. 2. Sondy do pomiaru prędkości.

a – anemometr skrzydełkowy; b – termoanemometr z sondą trójwłóknową; c – termoanemometr z trzema prostopadłymi elementami PT100; d – termoanemometr z trzema równoległymi elementami PT100

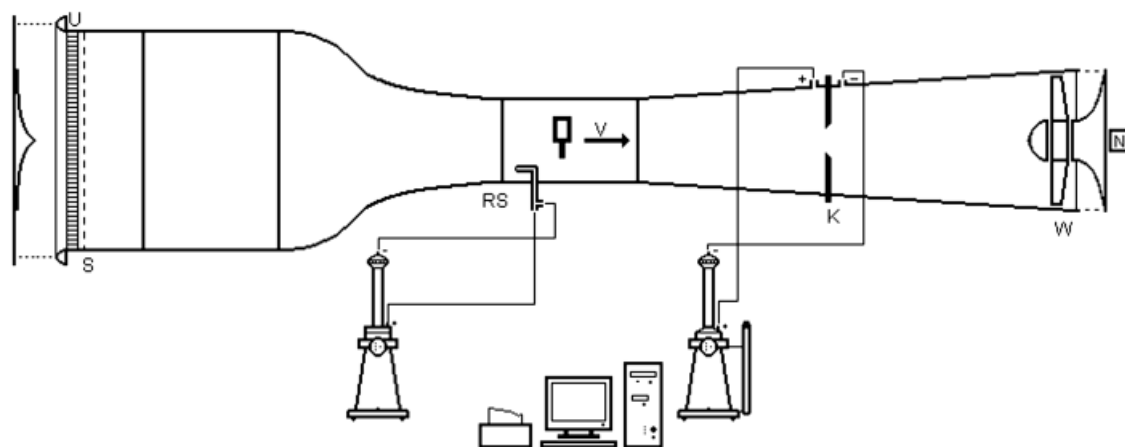
Ostatnie dwa z wymienionych czujników, są nowymi opracowaniami zrealizowanymi w IMG PAN (Ligęza, Poleszczyk, Skotniczny, 2009). Termoanemometr z trzema równoległymi elementami został skonstruowany na potrzeby badań opisanych w tym artykule, ze szczególnym uwzględnieniem badań *in situ*.

Przed pomiarami porównawczymi i po nich, określono charakterystyki wszystkich termoanemometrów (Rys. 3). Do tego celu wykorzystano tunel aerodynamiczny, przedstawiony schematycznie na Rys. 4.

Na charakterystykach zaznaczono niepewność zadawanej prędkości i odchylenie standardowe wskazywanej prędkości. Znaczące odchylenie wskazań czujnika PT100 wynika z tego, że przed pomiarami był on jedynie zgrubnie skalibrowany, w szczególności dotyczyło to kompensacji temperatury. Dobrano współczynniki korekcji odczytów czujników. Niewielkie różnice skorygowanych charakterystyk, uzasadniają użycie tak dobranych współczynników do korekty wyników pomiarów porównawczych w stanach ustalonych i przejściowych, opisanych w kolejnych dwóch podrozdziałach.



Rys. 3. Charakterystyki czujników termoanemometrycznych



Rys. 4. Schemat tunelu aerodynamicznego

2.2. Opis stanowiska pomiarowego

Wstępne pomiary przeprowadzono w dużej komorze tunelu aerodynamicznego IMG PAN. Komora ta jest położona na wlocie tunelu. Na jej dolocie znajduje się prostownica strugi i siatka, które mają wyrównać pole prędkości i ograniczyć skalę turbulencji przepływu. Na wylocie komory następuje 10-krotne zawężenie przekroju prowadzące do małej komory pomiarowej. Duża komora wraz z obszarem kontrakcji mają zapewnić równomierne pole prędkości o drobnowirowej turbulencji przepływu, w stanowiącej zasadniczy element pomiarowy tunelu, małej komorze pomiarowej.

Dużą komorę wybrano do badań ze względu na możliwość zabudowy systemu do wielopunktowego pomiaru prędkości i spodziewaną wyższą intensywność turbulencji. W jednej z serii pomiarów częściowo przesłonięto przekrój dolotowy, aby wygenerować dodatkowe zaburzenie przepływu.

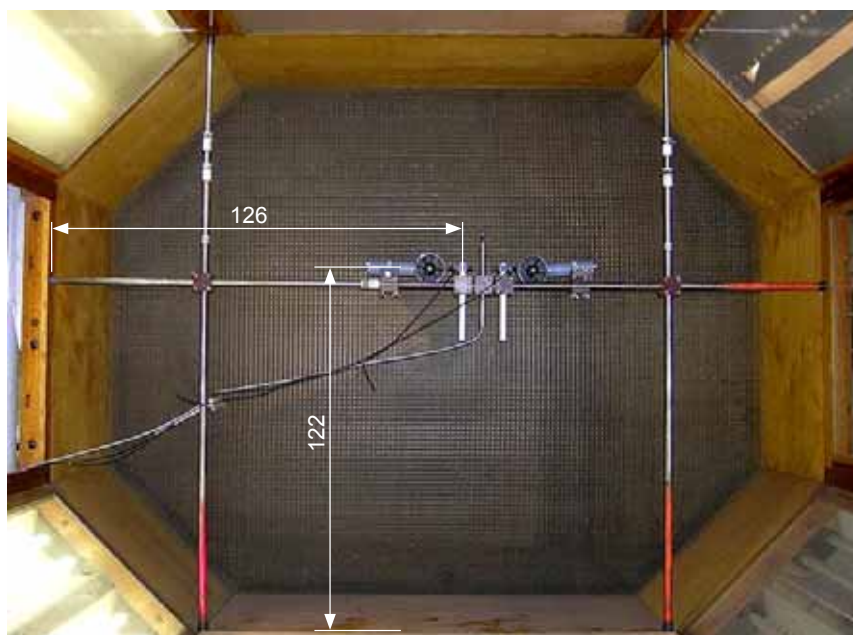
W dużej komorze można uzyskiwać prędkości w zakresie do 3.5 [m/s].

Wszystkie urządzenia pomiarowe zostały umieszczone na wysokości 122 cm od dna tunelu, oraz w odległości 126 cm od prawej strony tunelu (Rys. 5). Odległość przyrządów od otworu wlotowego do tunelu wynosi 70 cm. Przyrządy ustawione są w następującej kolejności (Rys. 6. od prawej strony):

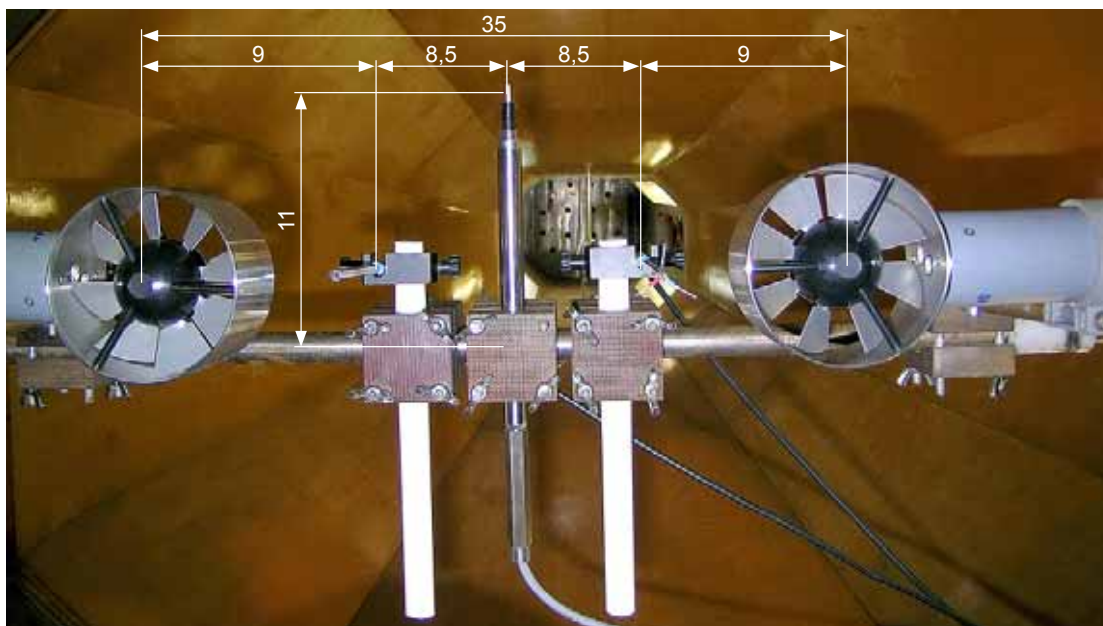
- anemometr skrzydełkowy nr 8 znajdujący się w odległości 126 cm od prawej strony tunelu, oraz 16 cm od ramienia mocującego,
- termooanemometr z trzema prostopadłymi elementami PT100 w odległości 9 cm od osi obrotu skrzydełka oraz 4 cm od końca anemometru nr 8, i 18 cm od ramienia mocującego,
- termooanemometr z trzema równoległymi elementami PT100 w odległości 8,5 cm od termooanemometru z trzema prostopadłymi elementami PT100,
- termooanemometr z sondą trójwłóknową w odległości 8,5 cm od termooanemometru z trzema równoległymi elementami PT100 oraz 17,5 cm od ramienia mocującego,
- anemometr skrzydełkowy nr 5 w odległości 9 cm od osi obrotu skrzydełka oraz 4 cm do termooanemometru z sondą trójwłóknową, i 35 cm od anemometru skrzydełkowego nr 8.

Przed wykonaniem rejestracji wszystkie czujniki prędkości zostały zsynchronizowane czasowo. Dane pomiarowe były gromadzone w pamięciach wewnętrznych (czujniki skrzydełkowe) lub przesyłane do komputera za pośrednictwem karty przetworników A/C.

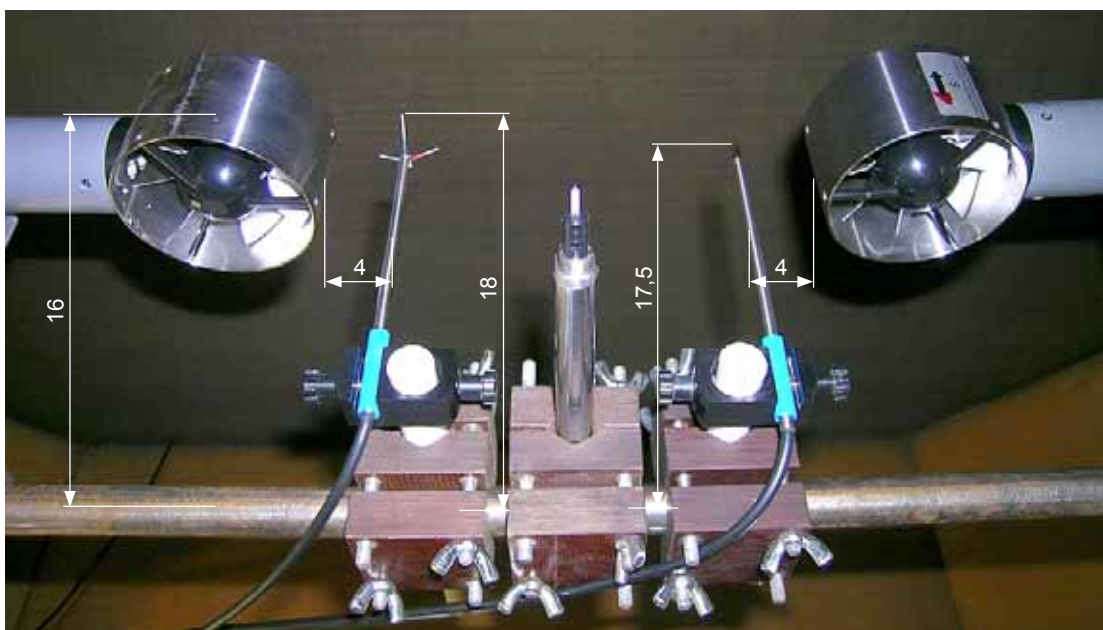
Na Rys. 7 pokazano widok zespołu czujników przygotowanych do badań porównawczych.



Rys. 5. Wlot tunelu widziany z wnętrza dużej komory i rozmieszczenie czujników prędkości



Rys. 6. Rozmieszczenie czujników prędkości – widok przyrządów od strony wlotu tunelu



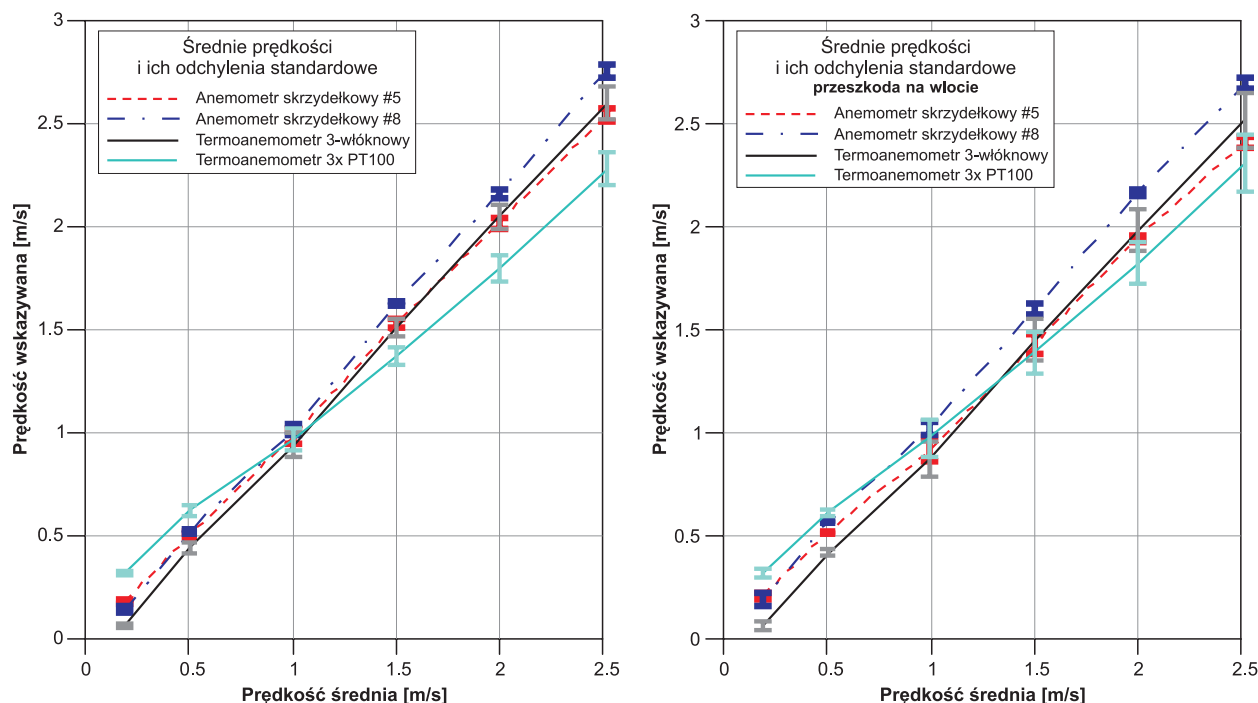
Rys. 7. Rozmieszczenie czujników prędkości – widok przyrządów od strony wnętrza tunelu

Większość rejestracji prowadzono w ustalonych warunkach przepływu. Zarejestrowano również rozruch i zatrzymanie przepływu, oraz przepływ podczas celowo wywołanych wahań prędkości obrotowej wentylatora tunelu.

2.1. Przebiegi czasowe prędkości w warunkach ustalonego przepływu

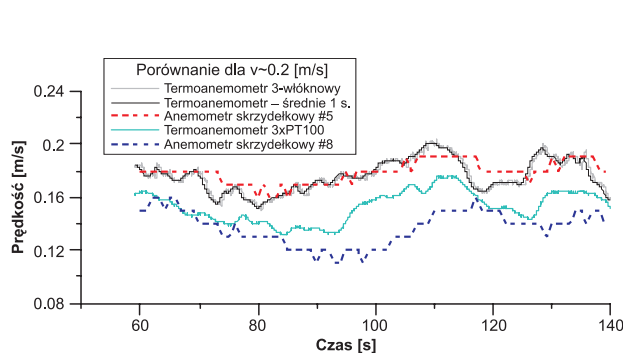
Podczas badań programowano obroty wentylatora tunelu tak, aby prędkość wskazywana przez rurkę spiętrzeniową w małej komorze tunelu mieściła się w zakresie od 2 do 25 [m/s]. Przedział ten podzielono na sześć punktów: 2,5, 10, 15, 20 i 25 [m/s]. Ponieważ przekrój dużej komory jest dziesięciokrotnie większy, dlatego prędkości w otoczeniu badanych w niej czujników zmieniały się w zakresie od 0,2 do 2,5 [m/s], przyjmując wartości bliskie 0,2, 0,5, 1, 1,5, 2, i 2,5 [m/s].

Zgodnie z oczekiwaniami intensywność turbulencji w dużej komorze tunelu była wyższa i wynosiła około 5% (Rys. 3 i Rys. 8). W drugiej serii pomiarów częściowo przesłonięto przekrój dolotowy by wygenerować dodatkowe zburzenie przepływu, co zwiększyło intensywność o około 2% (Rys. 1). Przysłonięcie dolotu miało najsilniejszy wpływ w przypadku prędkości wynoszącej około 1 [m/s].

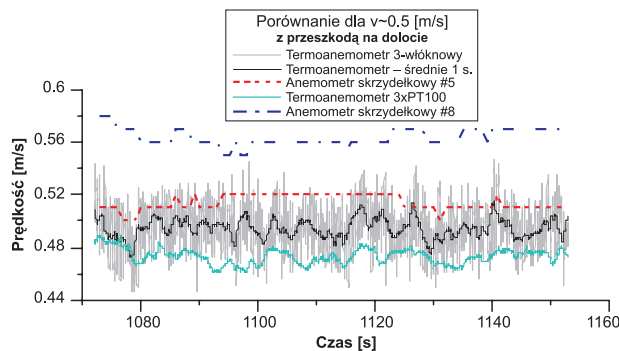
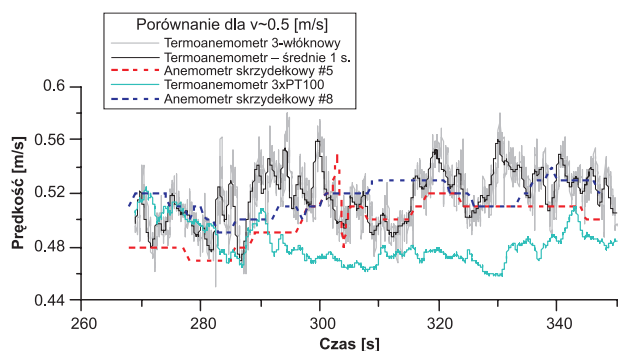
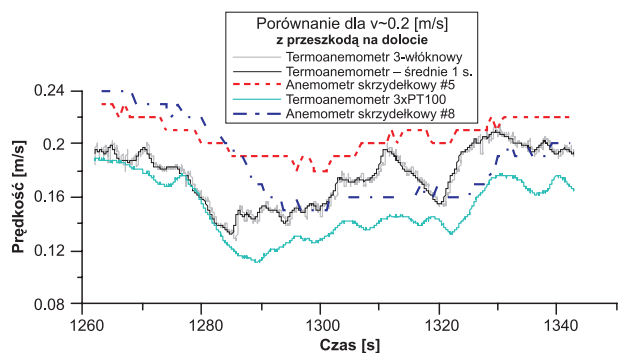


Rys. 8. Pomiar w dużej komorze tunelu aerodynamicznego – średnie prędkości i ich odchylenia standardowe

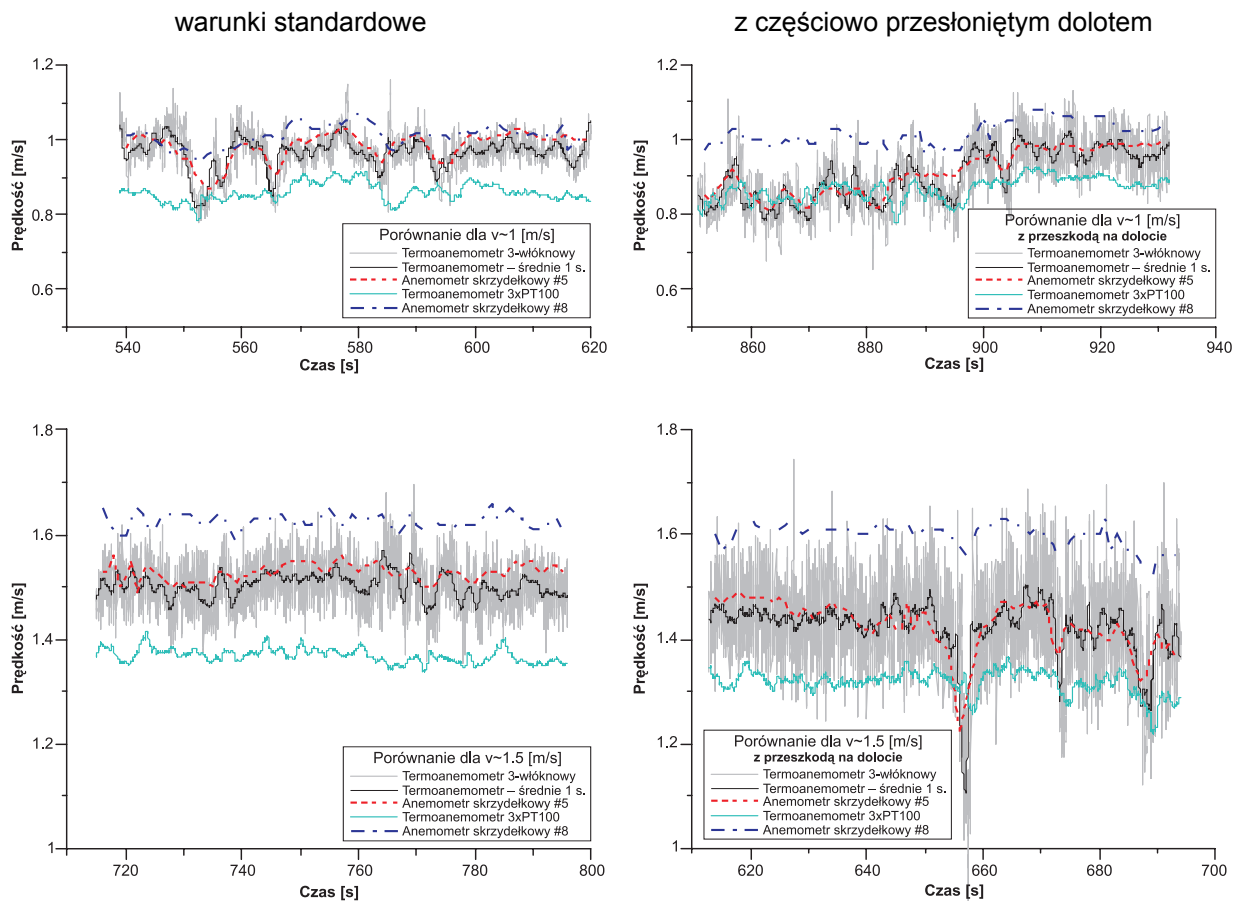
warunki standardowe



z częściowo przesłoniętym dolotem



Rys. 9. Przebiegi czasowe prędkości w dużej komorze tunelu aerodynamicznego, zakres 0,2 do 0,5 [m/s]



Rys. 10. Przebiegi czasowe prędkości w dużej komorze tunelu aerodynamicznego, zakres 1 do 1,5 [m/s]

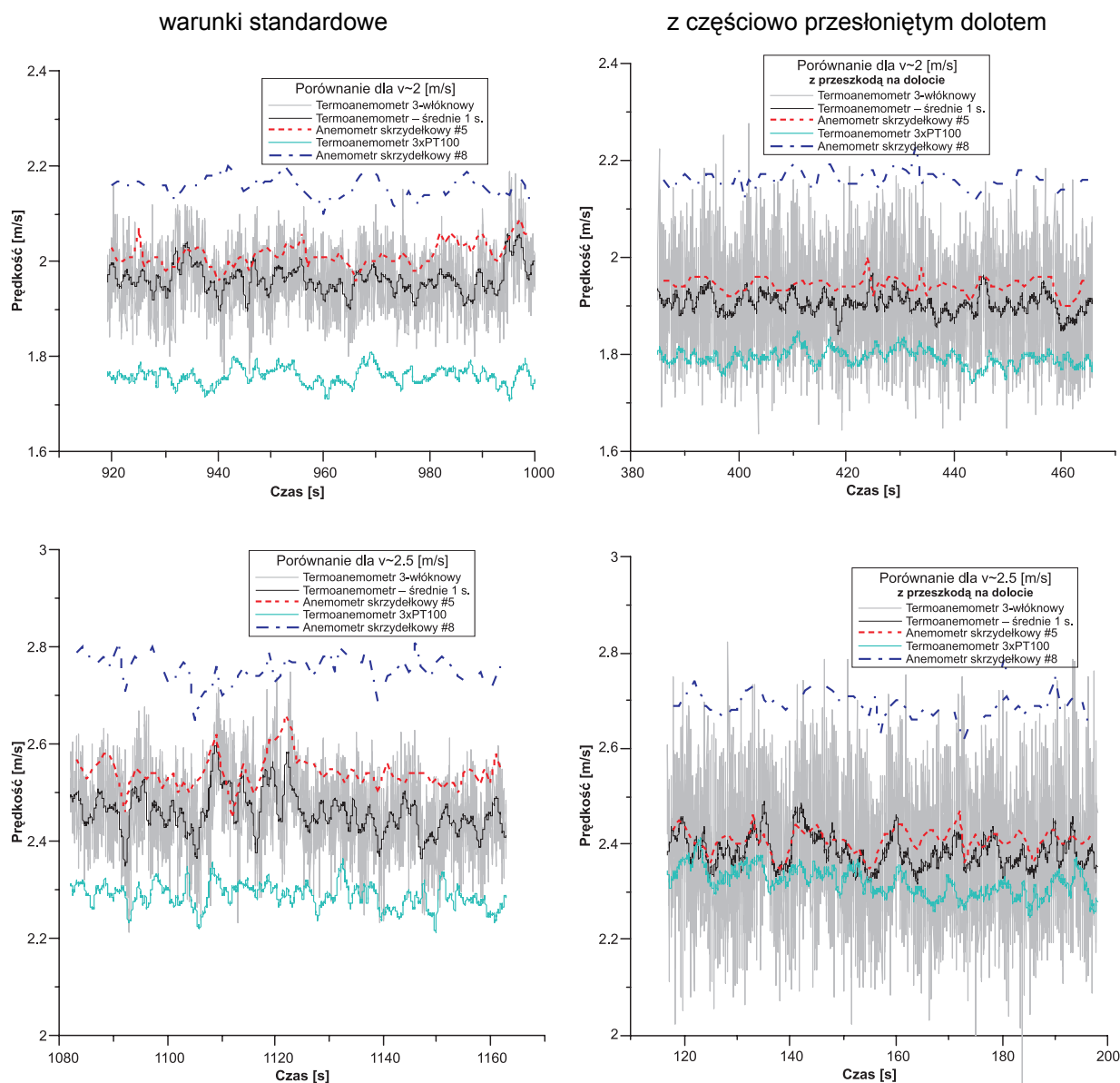
Sposób wzajemnego położenie czujników sugeruje, by porównywać parami sąsiadujące ze sobą, tj. anemometr skrzydełkowy nr 5 z drutowym czujnikiem termoanemometrycznym, oba czujniki termoanemometryczne oraz termoanemometr z czujnikami PT100 – z anemometrem skrzydełkowym nr 8. Różnice w prędkościach wskazywanych przez poszczególne czujniki były porównywalne z niepewnością pomiaru anemometrem skrzydełkowym, oraz niepewnością skorygowanych charakterystyk termoanemometrów z Rys. 3. Niepewność ta jest związana ze stosowaną metodą wzorcowania. W zakresie analizowanych prędkości nie dostrzeżono wyraźnej tendencji do zawyżania prędkości przez anemometr skrzydełkowy wskutek fluktuacji przepływu.

2.2. Przebiegi czasowe stanów przejściowych

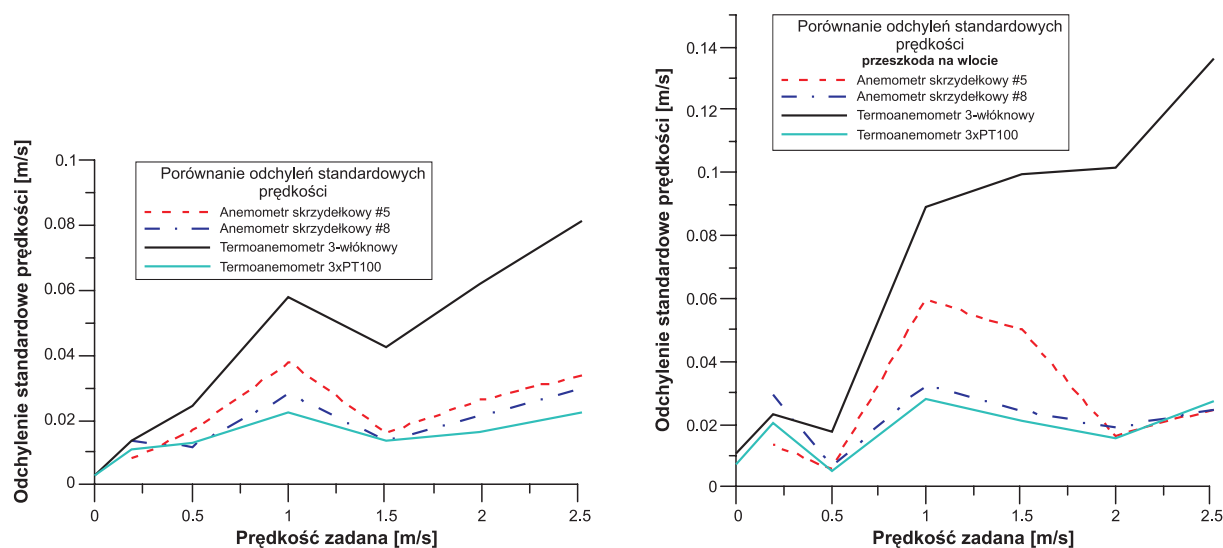
Przeprowadzono rejestracje stanów przejściowych przy rozruchu i zatrzymaniu przepływu. Przebiegi czasowe wskazań czujników prędkości przedstawiono na Rys. 13, 14 i 15.

Zarejestrowane przebiegi prędkości ukazują różnicę w dynamicznych właściwościach porównywanych czujników. Najkrótszą stałą czasową ma termoanemometr z czujnikami drutowymi. Jest on w stanie najlepiej przedstawić faktyczną zmienność pola prędkości w turbulentnym przepływie. Ma on również najmniejsze rozmiary – dostarcza więc informacji o prędkości lokalnej. Czujniki termistorowe mają znacznie większe rozmiary geometryczne i większą stałą czasową. Ich przewaga nad anemometrem skrzydełkowym polega na zdolności do dostarczania informacji o wektorze prędkości, podczas gdy anemometr skrzydełkowy mierzy jedną składową uśrednioną po obszarze przekroju sondy. Dodatkowo wirnik anemometru skrzydełkowego wolniej wytraca prędkość niż się rozpędza, co można stwierdzić porównując jego odpowiedź na wzrosty i spadki prędkości.

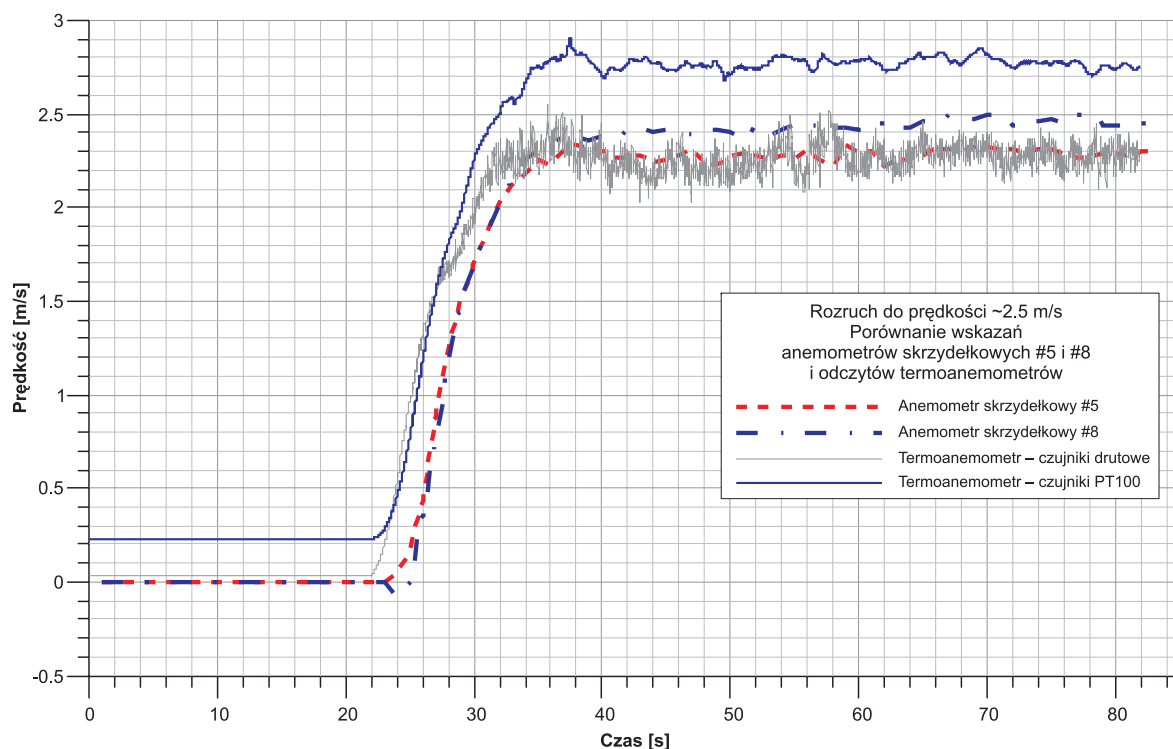
Trudno wyjaśnić dlaczego wskazania termoanemometru z czujnikami PT100 przyjmują najniższe wartości. Jeśli założymy, że profil prędkości w małej komorze jest lekko wypukły, to najniższą wartość powinien wskazywać anemometr nr 5, wyższą termoanemometr z czujnikiem drutowym, jeszcze wyższą termoanemometr z czujnikiem PT100, a najwyższą anemometr nr 8 znajdujący się w środku przekroju



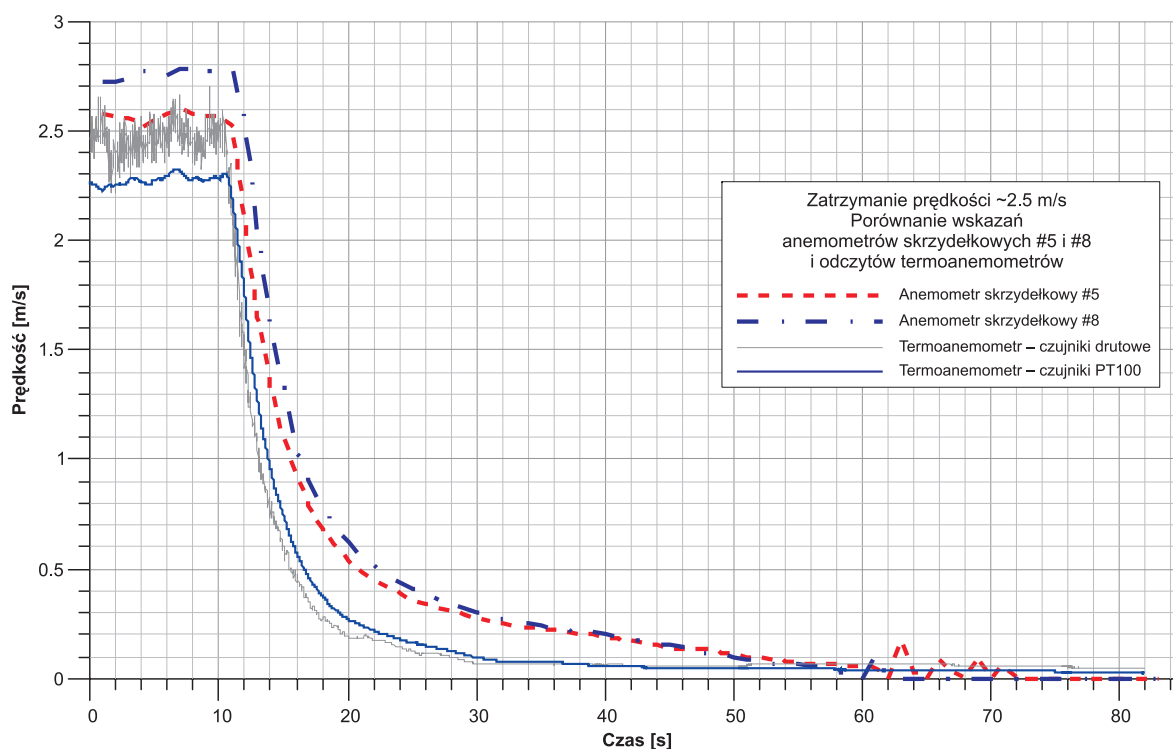
Rys. 11. Przebiegi czasowe prędkości w dużej komorze tunelu aerodynamicznego, zakres 2 do 2,5 [m/s]



Rys. 12. Odchylenia standardowe prędkości wskazywanych przez porównywane czujniki

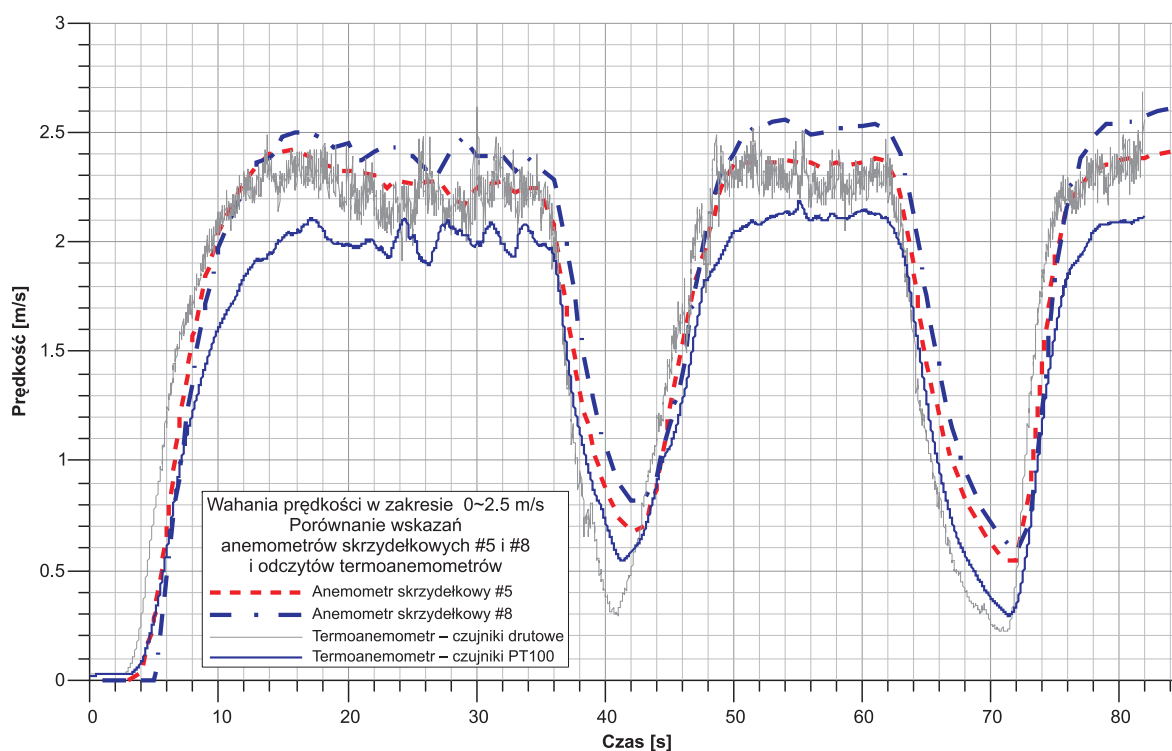


Rys. 13. Wskazania czujników prędkości podczas rozruchu tunelu aerodynamicznego



Rys. 14. Wskazania czujników prędkości podczas zatrzymania przepływu w tunelu aerodynamicznym

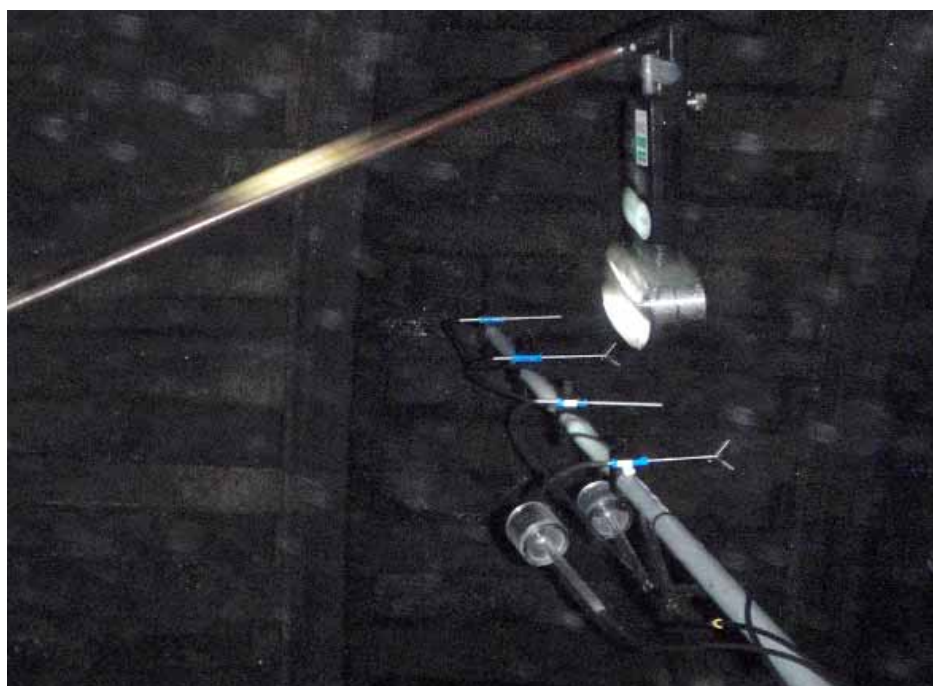
komory. Dla większości pomiarów najwyższe są wskazania anemometru nr 8. Anemometr nr 5 pokazuje nieco większą prędkość niż termoanemometr z czujnikiem drutowym. Najniższe wartości pokazuje termoanemometr z czujnikiem PT100. Wyższe wskazania anemometrów skrzydełkowych można wyjaśniać znaną z literatury tendencją do zawyżania pomiaru wskutek fluktuacji przepływu.



Rys. 15. Wskazania czujników prędkości podczas wahań prędkości wentylatora wymuszającego przepływ w tunelu aerodynamicznym

3. Pomiary prędkości w chodniku kopalnianym

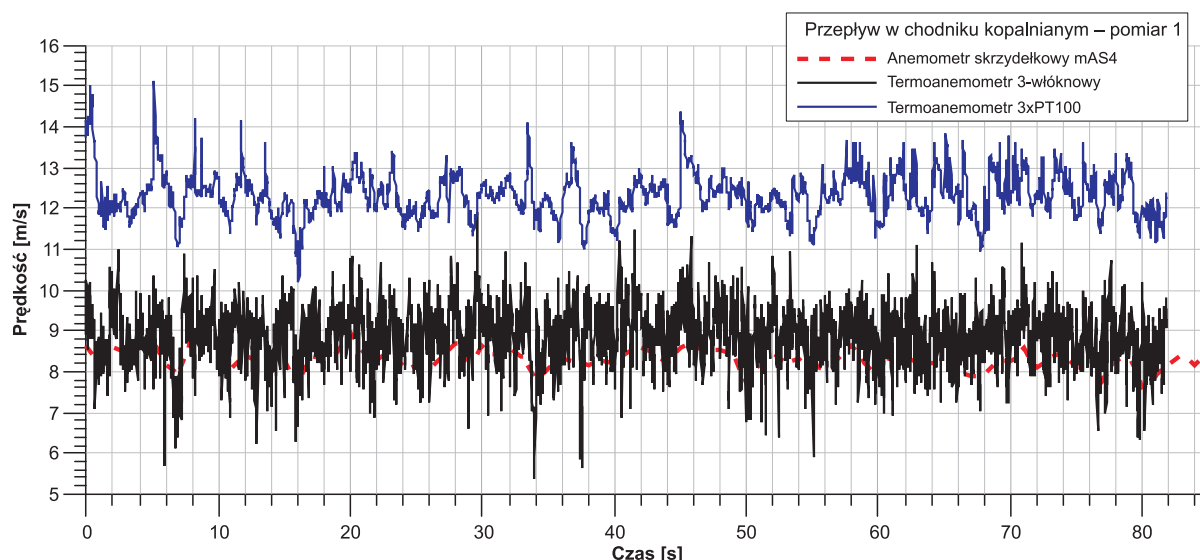
Miejsce pomiarów był „przekop wschodni”, poziom 215, w jednej z kopalń nie zagrożonych wybuchem metanu. Było to długie, prawie poziome wyrobisko, prowadzone w obudowie łukowej uzupełnionej bloczkami betonowymi.



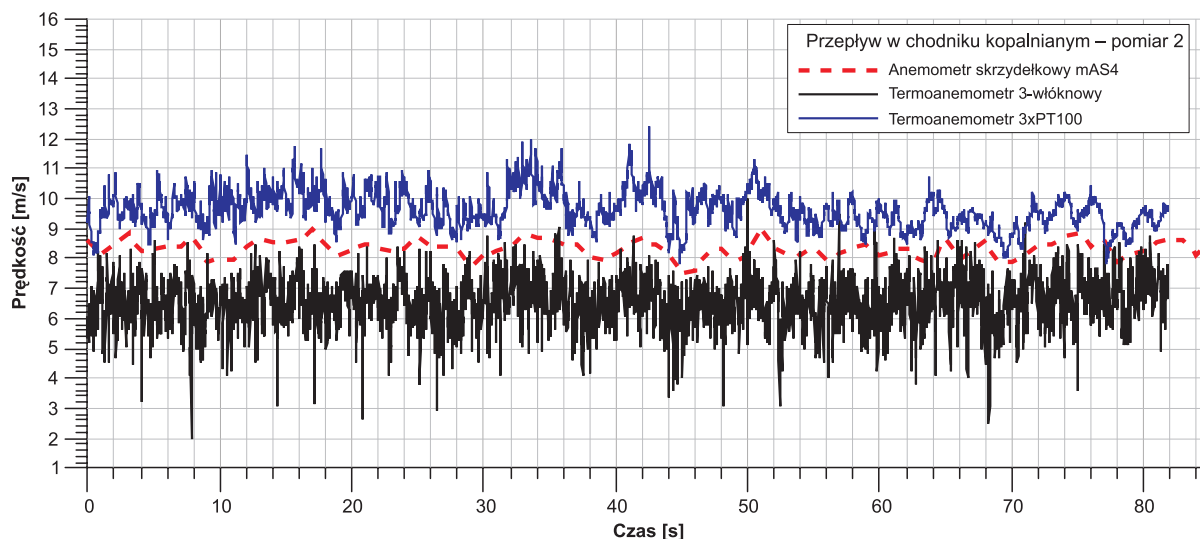
Rys. 16. Ułożenie sond prędkości podczas pomiarów porównawczych w chodniku kopalnianym

Prędkość powietrza wynosiła około 8 [m/s], temperatura 17 [°C]. Awaria instalacji odwadniania od strony dolotu spowodowała, że w powietrzu unosiły się krople wody. Powodowało to szczególnie trudne warunki pracy dla termooanemometrów i mogło mieć wpływ na dokładność ich pomiarów. Pomimo trudnych warunków udało się wykonać wiele rejestracji prędkości przy pomocy obu typów czujników (drutowy i termistorowy). Zarejestrowane prędkości są obciążone jednak dużą niepewnością.

Wykonano trzy kolejne równoległe rejestracje prędkości przy pomocy anemometru skrzydełkowego uAS4 i dwóch czujników termooanemometrycznych. Rozmieszczenie anemometrów przedstawiono na Rys. 16.

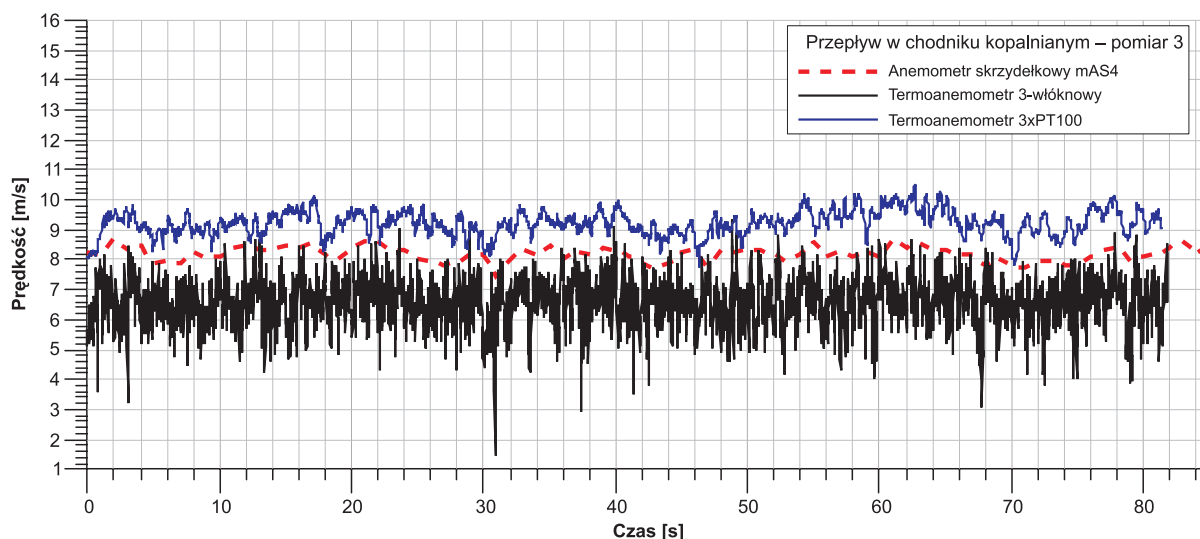


Rys. 17. Przebiegi zmian prędkości zarejestrowanych w chodniku kopalnianym – pomiar 1



Rys. 18. Przebiegi zmian prędkości zarejestrowanych w chodniku kopalnianym – pomiar 2

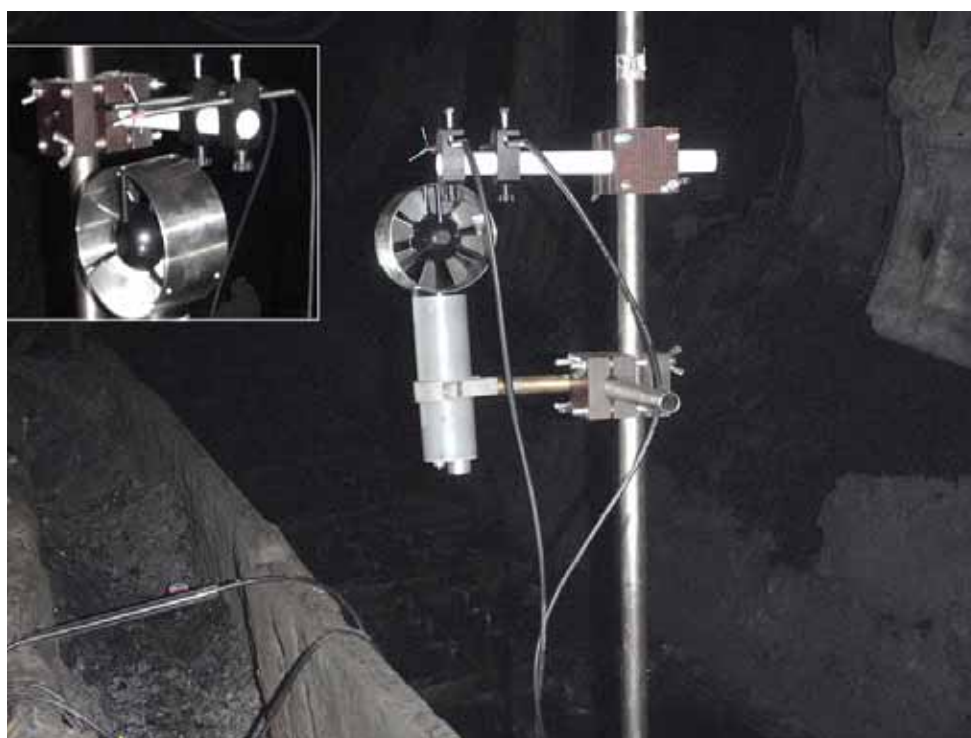
Zarejestrowane prędkości wykazują dużą zgodność w zakresie kształtu przebiegów, ograniczoną przez różnice w dynamicznych właściwościach czujników. Anemometr skrzydełkowy dobrze oddaje długookresowe (rzędu kilku sekund) wahania prędkości. Trudności w kompensacji wpływu warunków środowiskowych na charakterystyki termooanemometrów nie pozwalają na porównania ilościowe.



Rys. 19. Przebiegi zmian prędkości zarejestrowanych w chodniku kopalnianym – pomiar 3

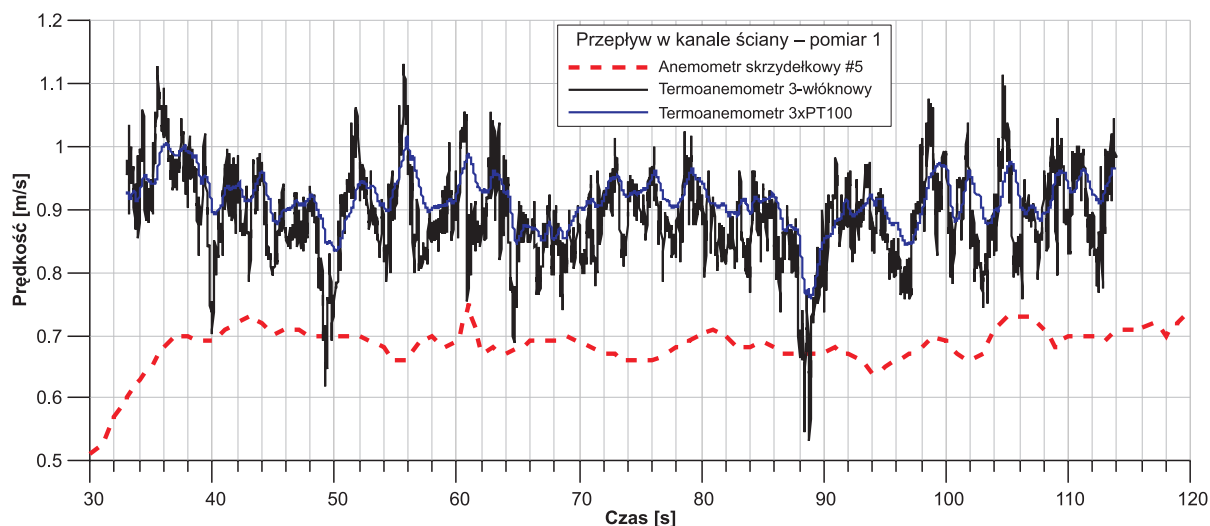
4. Pomiary prędkości w rejonie ściany

Miejszem pomiarów był kanał ściany wydobywczej w jednej z kopalń nie zagrożonych wybuchem metanu. Czujniki umieszczono blisko początku 3 sekcji obudowy, licząc od wylotu ściany. Miejsce to jest reprezentatywne dla w pełni rozwiniętego przepływu w kanale ściany.

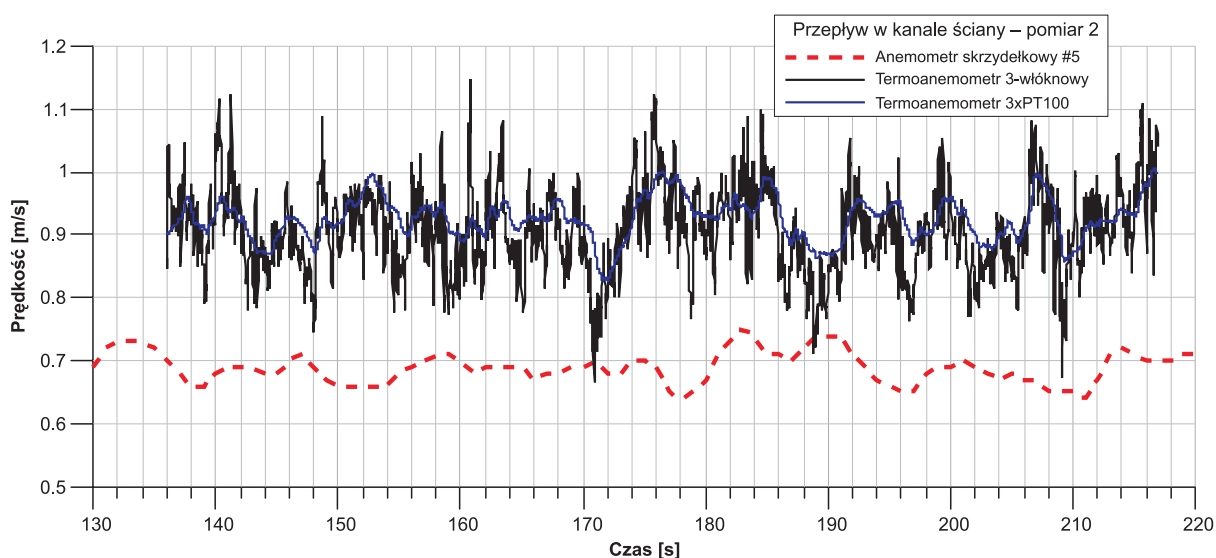


Rys. 20. Widok czujników prędkości podczas pomiaru w ścianie wydobywczej

Zakres rejestrowanych prędkości i intensywności turbulencji był porównywalny do warunków laboratoryjnych w dużej komorze tunelu aerodynamicznego. Zwracają uwagę wyraźnie wyższe wartości prędkości zarejestrowanych przez oba termoanemometry, i brak podobieństwa między wskazaniem anemometru skrzydełkowego a pozostałymi czujnikami.



Rys. 21. Przebiegi zmian prędkości zarejestrowanych w ścianie wydobywczej – pomiar 1



Rys. 22. Przebiegi zmian prędkości zarejestrowanych w ścianie wydobywczej – pomiar 2

5. Weryfikacja pomiarów strumienia objętości powietrza wykonywanych wielopunktowym systemem anemometrycznym

System wielopunktowego pomiaru pola prędkości (SWPPP) składa się ze skrzydełkowych czujników anemometrycznych rozmieszczonych w polu przekroju poprzecznego strumienia. Na podstawie pomiarów lokalnych wartości prędkości, w skończonej ilości punktów, płaszczyzny estymuje się rozkład prędkości wykorzystując metodę triangulacji liniowej. Umożliwia to wyznaczenie strumienia objętości metodą pola prędkości (Krach i in., 2006). Urządzenie jest wykorzystywane do pomiarów strumienia objętości w wyrobiskach kopalń głębinowych

W celu zwalidowania metody pomiaru system został umieszczony w dużej komorze tunelu aerodynamicznego (Rys. 4 i 23). Porównywano wyniki pomiarów z wartościami strumienia, wyznaczonego na podstawie znajomości prędkości w małej komorze pomiarowej tunelu.

Zgodnie z dokumentacją techniczną tunelu pola przekroju komór pomiarowych są następujące:

- Pole przekroju komory pomiarowej małej: $A_A = 0,4641 \text{ m}^2$,
- Pole przekroju komory pomiarowej dużej: $A_B = 4,589 \text{ m}^2$.

Kontrakcja wynosi: $A_A/A_B = 0,101$.

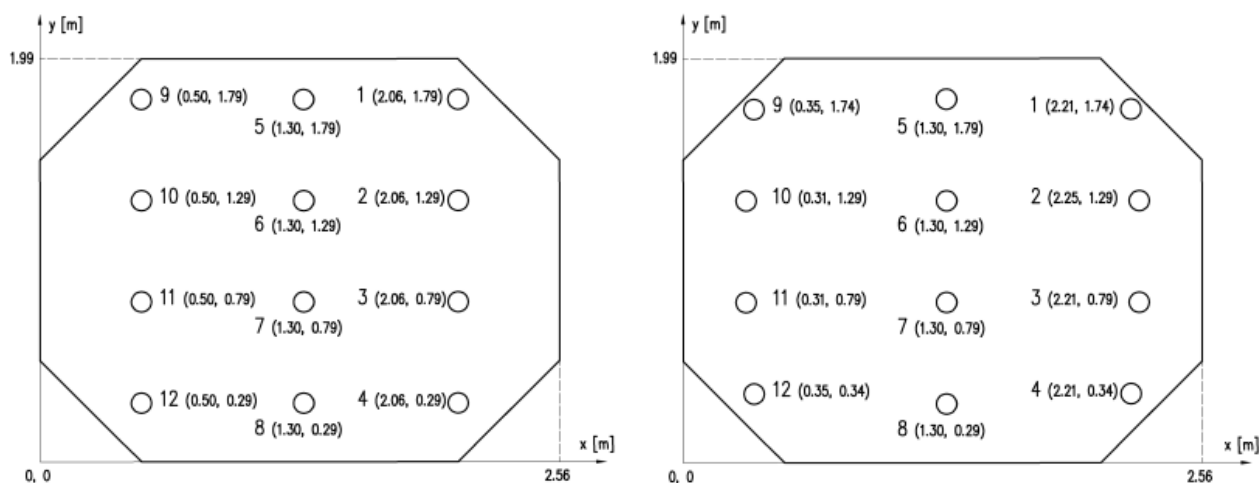


Rys. 23. System wielopunktowego pomiaru pola prędkości umieszczony w dużej komorze tunelu aerodynamicznego

Dla uzyskania w dużej komorze prędkości odpowiadające dolnemu zakresowi pomiarowemu czujników, prędkości w małej komorze nie mogły być mniejsze niż 2 m/s. W związku z tym pomiary prędkości w małej komorze były wykonywane przy pomocy zainstalowanej w niej rurki spiętrzającej. W zakresie mierzonych prędkości niepewność pomiaru mieściła się w przedziale od 0,211 m/s do 0,45 m/s.

Na podstawie badań profilu prędkości w małej komorze, wykonywanych przez A. Kracha (Chmiel i Krach, 2003), przyjęto płaskość profilu prędkości w całym obszarze przekroju komory. Na obecnym etapie walidowania systemu, szczególnie w kontekście jego zastosowań w wyrobiskach kopalń, założenie takie jest uzasadnione i nie wpływa w istotny sposób na niepewność pomiaru.

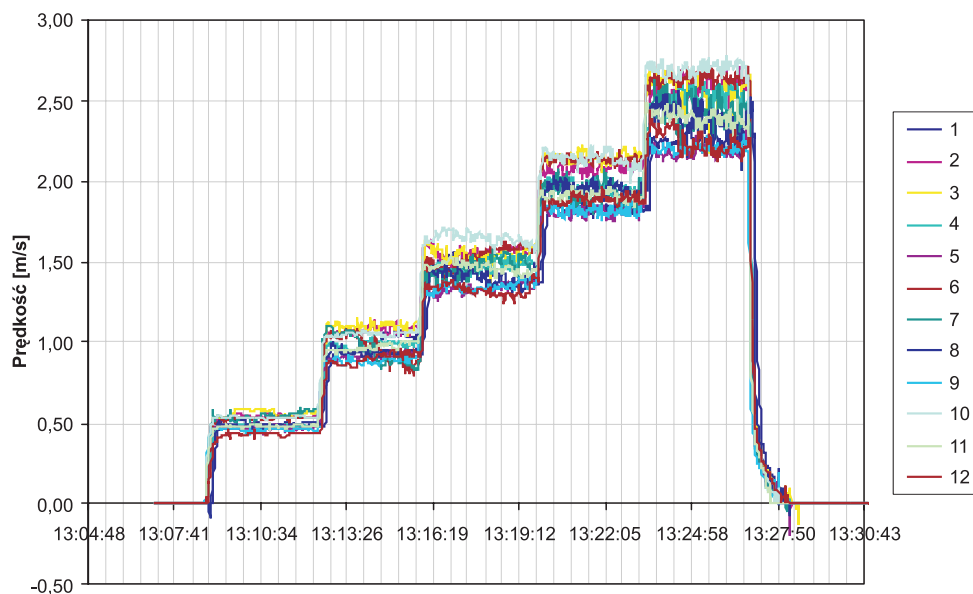
Czujniki anemometryczne znajdowały się w odległości 40 cm od prostownicy strugi wlotowej. Wykorzystano 12 czujników rozmieszczonych na dwa różne sposoby, tak jak pokazano na Rys. 24. W stosunku do położenia I (lewy schemat na Rys. 24) w położeniu II (prawy schemat na Rys. 24) dokonano przesunięcia skrajnych czujników w pobliże ścian bocznych dużej komory.



Rys. 24. Rozmieszczenie czujników anemometrycznych w przekroju dużej komory pomiarowej

Na rys. 25 pokazano zarejestrowany przez czujniki przebieg zmian prędkości lokalnych dla pięciu prędkości zmierzonych w małej komorze: 5, 10, 15, 20 m/s (dokładne wartości prędkości podano w Tab. 1) dla I rozmieszczenia czujników.

Rejestracje były wykonywane synchronicznie (jednocześnie przez wszystkie czujniki), z częstotliwością 1 Hz. Można zauważyć, że profil prędkości w pobliżu prostownicy nie jest płaski i zmienia się wraz ze wzrostem prędkości. Zgodnie z oczekiwaniami występują również fluktuacje prędkości w całym zakresie mierzonych wartości.



Rys. 25. Rejestracja prędkości lokalnych przez czujniki anemometryczne

Rys. 26 i 27 pokazują okna graficzne programu realizującego obliczenia wartości strumienia dla I i II położenia czujników. Widoczne są zmiany strumienia objętości we wnętrzu dużej komory, wynikające ze zmian prędkości powietrza w komorze małej.

Program wylicza także wartość pola przekroju. Obliczenia realizowane są na podstawie danych z pomiarów geometrycznych rozmieszczenia czujników (Rys. 24) oraz na podstawie przyjętego położenia punktów brzegowych (Krach i i., 2006).

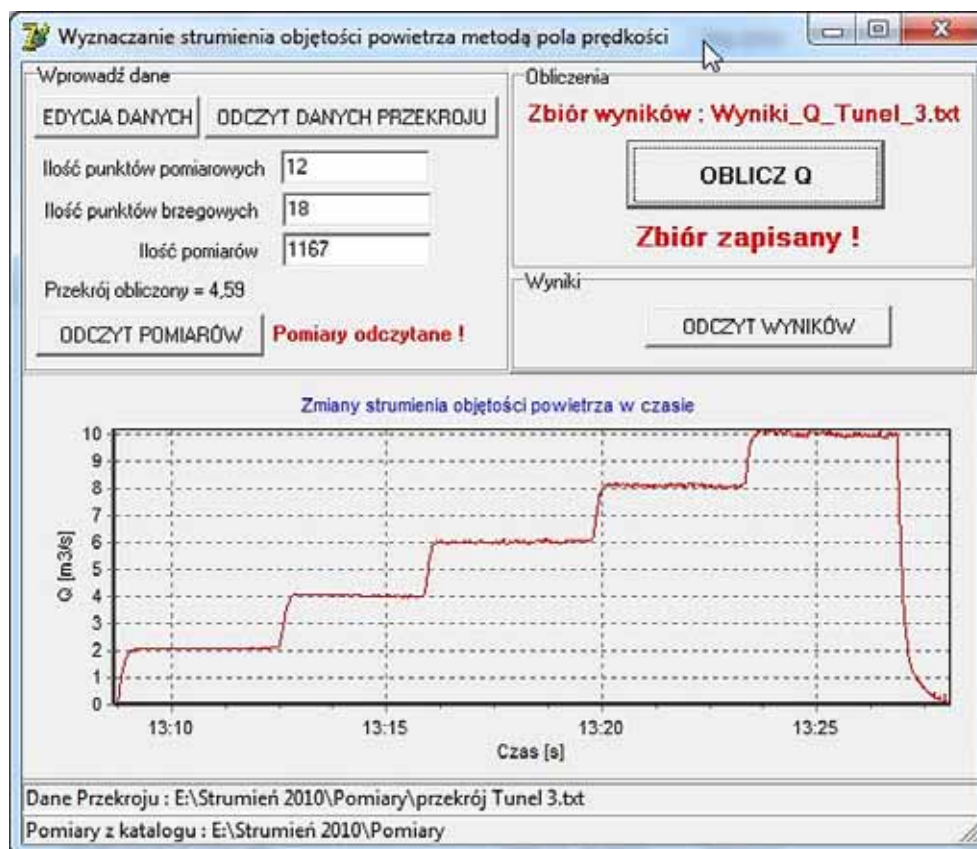
Należy zwrócić uwagę na bardzo dobrą zgodność pomiędzy polem przekroju podanym w dokumentacji technicznej; $4,589 \text{ m}^2$, a polem obliczonym przez program; $4,59 \text{ m}^2$.

Wyniki pomiarów wielkości strumienia w stanach ustalonych przepływu, dla obu rozmieszczeń czujników, przedstawiono w Tab. 1.

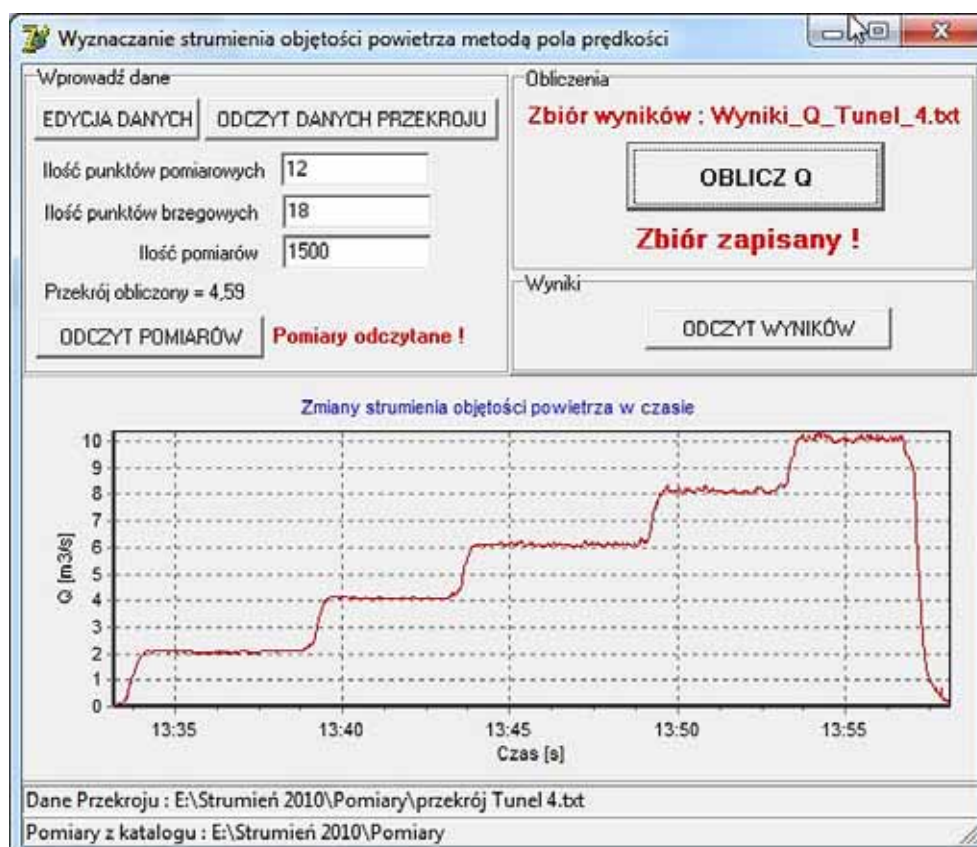
Tab. 1. Wielkości strumienia objętości wyznaczonego przez pomiar prędkości w małej komorze tunelu i pomiar systemem wielopunktowym w dużej komorze tunelu aerodynamicznego

Prędkość [m/s]	Strumień objętości w małej komorze pomiarowej [m ³ /s]	Strumień obliczony przez SWPPP dla I położenia czujników w dużej komorze pomiarowej [m ³ /s]	Strumień obliczony przez SWPPP dla II położenia czujników w dużej komorze pomiarowej [m ³ /s]
5,12	2,38	2,08	2,08
10,07	4,67	4,04	4,09
15,03	6,98	6,03	6,11
20,03	9,30	8,12	8,14
24,78	11,50	10,02	10,12

Błąd względny dla każdego przypadku wartości strumienia obliczonego przy I sposobie rozmieszczenia czujników wynosi około 13%. Zmiana położenia czujników nie spowodowała znaczącej zmiany w obliczanych wielkościach strumienia. Można zauważyć małe zmniejszenie błędu dla większych strumieni objętości.



Rys. 26. Obliczenie strumienia objętości dla I rozmieszczenia czujników



Rys. 27. Obliczenie strumienia objętości dla II rozmieszczenia czujników

Różnice w wielkości zmierzonego strumienia w stosunku do strumienia odniesienia (strumień w małej komorze pomiarowej) mogą wynikać z przyjętych do obliczeń w metodzie pola prędkości modeli matematycznych. Szczególnie mogłaby tu decydować zależność określająca profil prędkości na odcinku pomiędzy czujnikiem a punktem brzegowym. Zależność ta jest wyprowadzona dla przypadku kiedy ściany przewodu, przez który przepływa strumień powietrza, mają dużą chropowatość. Przy jej wyprowadzaniu posługiwano się między innymi danymi pomiarowymi prędkości z wyrobiska korytarzowego KWK Budryk. Dla przewodów gładkich, a za taki należy uznać dużą komorę tunelu aerodynamicznego, profil prędkości jest bardziej uwypuklony niż profil prędkości w przewodzie chropowatym. Takie rozumowanie wyjaśniałoby zaniżanie wielkości strumienia przez system SWPPP, w stosunku do strumienia odniesienia.

7. Podsumowanie i wnioski

Prowadzono badania porównawcze anemometrów skrzydełkowych i dwóch rodzajów czujników termooanemometrycznych do pomiaru wektora prędkości – drutowych i z termistorami PT100. Pomiaru realizowano w tunelu aerodynamicznym i wyrobiskach kopalni – chodniku i kanale ściany. W warunkach laboratoryjnych jest możliwe wzorcowanie czujników bezpośrednio przed i po porównaniach. Daje to podstawę do ilościowych porównań. W warunkach kopalnianych nie było możliwości wzorcowania czujników, co zwiększało niepewność pomiaru termooanemometrami, które cechuje znaczna wrażliwość wskazań na warunki środowiskowe. Rejestracje stanów przejściowych potwierdziły znaną z literatury wolniejszą reakcję anemometrów skrzydełkowych na spadek prędkości niż na jej wzrost. Pomiaru laboratoryjne nie wykazały jednak znaczącej tendencji anemometrów skrzydełkowych do zawyżania wskazań wskutek fluktuacji prędkości. Pomiaru w kopalni dostarczyły informacji o poziomie fluktuacji przepływu, co pozwala na przybliżone oszacowanie składowej niepewności pomiaru związanej z fluktuacjami przepływu. Dalsze badania powinny mieć charakter laboratoryjny i polegać na badaniu charakterystyk czujników na stanowisku umożliwiającym wymuszanie periodycznych zmian prędkości.

W wyniku walidacji systemu wielopunktowego pomiaru pola prędkości, wykorzystywanego do wyznaczania strumienia objętości, stwierdzono nieznaczne zaniżanie mierzonych wartości strumienia. Było ono spowodowane innym niż przewidują algorytmy obliczeniowe systemu, kształtowaniem się profilu prędkości w pobliżu brzegów przekroju komory tunelu aerodynamicznego. System projektowany był z myślą o wykorzystaniu w warunkach wyrobisk kopalnianych, tymczasem walidację przeprowadzano w tunelu aerodynamicznym. Niewątpliwie najlepszym sposobem walidacji byłoby przeprowadzenie jej w warunkach *in situ*. Problemem, który się z takim rozwiązaniem wiąże, jest duża trudność z kontrolowaniem parametrów strumienia wzorcowego. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki potwierdzają wysoką dokładność metody wielopunktowego pomiaru pola prędkości w wyznaczaniu strumienia objętości. Jest to obecnie najdokładniejsza metoda pomiaru strumienia objętości, która może być stosowana w polskich kopalniach w celach badawczych lub kontrolnych.

Przeprowadzone eksperymenty oraz analiza literatury pokazują, że jest możliwe zbudowanie termooanemometru wyznaczającego wektor prędkości w płaszczyźnie prostopadłej do osi symetrii czujnika. Możliwe jest kilka różnych rozwiązań czujnika i układów elektronicznych. Wydaje się, że procedura wyznaczania wektora prędkości będzie skomplikowana i konieczne będzie stosowanie techniki mikroprocesorowej. Jak wynika z uzyskanych wyników, wzorcowanie takich termooanemometrów wydaje się być zagadnieniem skomplikowanym i bardzo pracochłonnym. Z tego powodu musi być w znacznym stopniu zautomatyzowane.

Niniejszy artykuł zrealizowano w ramach działalności statutowej IMG-PAN z wykorzystaniem wyników projektu badawczego-rozwojowego N N524 167535 finansowanego przez MNiSW.

Literatura

1. Chmiel W., Krach A., 2003: *Badania porównawcze małych prędkości w tunelu aerodynamicznym w systemie potwierdzenia metrologicznego*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 5, nr 2. Kraków.
2. Chmiel W., Kruczkowski J., 2005: *Badanie wpływu zaburzeń profilu prędkości powietrza na pomiary wykonywane anemometrami stacjonarnymi różnych typów*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 7, nr 1-2. Kraków.
3. Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Pałka T., 2006: *Zmienność pola prędkości i strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalń głębinowych* Arch. Min. Sci., Monografia, Nr 1.

8. Kruczkowski J., 1999: *Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości powietrza wyrobisku kopalnianym*. Praca doktorska. IMG PAN.
5. Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P., 2009: *Hot wire anemometric measurement systems in mining applications*, Arch. Min. Sci., Monograph, No. 6, P. 92.
6. Socha K., 2009: *Termoanemometryczna metoda wyznaczania modułów składowych oraz zwrotu wektora prędkości w dwuwymiarowych przepływach gazu*, Arch. Min. Sci., Seria: Monografia, Nr 5.
7. Wasilewski S., 1996: *Badania przepływu powietrza w kopalni*, Arch. Min. Sci., vol. 41, No 4, p. 411-438.

Measurements of the volumetric flow rate in the context of dynamic behaviour of anemometric sensors

Abstract

Comparative analyses was performed of vane anemometers and two types of wire sensors intended for measurements of velocity vectors: a hot-wire anemometer and that comprising thermistors PT100. Measurements were implemented inside a wind tunnel, in the mine heading and in the face region. Sensors in laboratory conditions were calibrated prior to and after the comparative tests, thus enabling the quantitative comparison. In the mines such calibration procedure was not possible, which further enhanced the uncertainty involved in hot-wire measurements as the hot-wire sensors are most sensitive to ambience conditions. Recordings of transients revealed a phenomenon already reported in literature, i.e. the slower response of vane anemometers to velocity decrease than increase. Laboratory tests, however, did not reveal major tendency of the vane anemometers' readings to become too high due to velocity fluctuations. Measurements taken in the mine provided data on the level of flow fluctuations, enabling us to estimate the uncertainty component associated with flow fluctuations. The system implementing multi-point measurement of velocity fields was subjected to the validation procedure. The system, which allows for finding the volumetric flow rates of passing air, is mounted in the test chamber inside the wind tunnel. The measurement data were then compared by relating them to airflow rates in the test chamber. Sensors making up the system were located at a close distance to the straightening vane installed at the inlet to the wind tunnel, in the region where it is reasonable to expect airflow fluctuations. To facilitate the testing in the mine conditions, a hot-wire sensor was engineered utilising parallel elements PT100, to enable the measurements of velocity vectors in that plane.

Keywords: velocity fluctuations, vane anemometer, hot-wire anemometer, multi-point measurements of velocity fields of airflow, volumetric flow rate, mine ventilation