

Termoanemometr z możliwością wyznaczania wektora prędkości w płaszczyźnie

WŁADYSŁAW CIERNIAK, TADEUSZ BACIA

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

Streszczenie

Artykuł zawiera opis badań termoanemometru zawierającego trzy walcowe połączone szeregowo grzane czujniki PT100, ustawione równolegle w wierzchołkach trójkąta równoramiennego i włączone w układ termoanemometru stałonapięciowego. Układ równolegle ustawionych czujników umożliwia wyznaczenie kierunku i zwrotu wektora prędkości w płaszczyźnie do nich prostopadłej.

Słowa kluczowe: termoanemometria

1. Wstęp

W niektórych przypadkach potrzebna jest znajomość wektora prędkości płynu. Stosowane do badania turbulencji termoanemometry z trzema przestrzennie rozmieszczonymi włóknami pozwalają na wyznaczenie wartości składowych wektora bez wyznaczenia jego zwrotu. Zagadnieniu wyznaczania zwrotu wektora prędkości przy pomocy termoanemometrów poświęcono wiele prac. Ich spis jak i ich omówienie można znaleźć w publikacji [K. Socha]. Zastosowane rozwiązanie czujnika zostało ogłoszone przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej [P. Ligęza] w 2007 roku.. Przy tym rozwiązaniu włókna wzajemnie na siebie cieplnie oddziałują tylko przy pewnych kierunkach wektora prędkości.

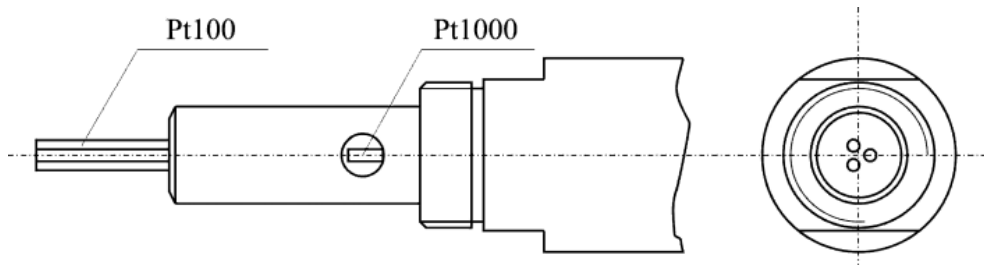
Ustawione równolegle w niewielkich odległościach (rzędu ich wymiarów poprzecznych) od siebie czujniki oddziałują cieplnie. Czujnik znajdujący się na stornie zawietrznej jest dodatkowo ogrzewany, a więc ma wyższą temperaturę i też większą rezystancję. Przy jednakowym prądzie płynącym przez czujniki występuje na nim większe napięcie. Za opływającym walcem występuje większa turbulencja zwiększająca odbiór ciepła czujnika znajdującego się po stronie zawietrznej [S. Wiśniewski, rozdział 7.6]. To zjawisko zmniejsza nagrzewanie czujników znajdujących się po zawietrznej stronie.

Pomiar napięcia na każdym z czujników w funkcji kąta mierzonego od kierunku napływającego powietrza wyznaczy trzy charakterystyki przesunięte w fazie o 120° . W zakresie prędkości (jej modułu), w którym te charakterystyki są jednoznaczne, z wartości tych napięć i prądu można wyznaczyć wartość i kierunek jej wektora.

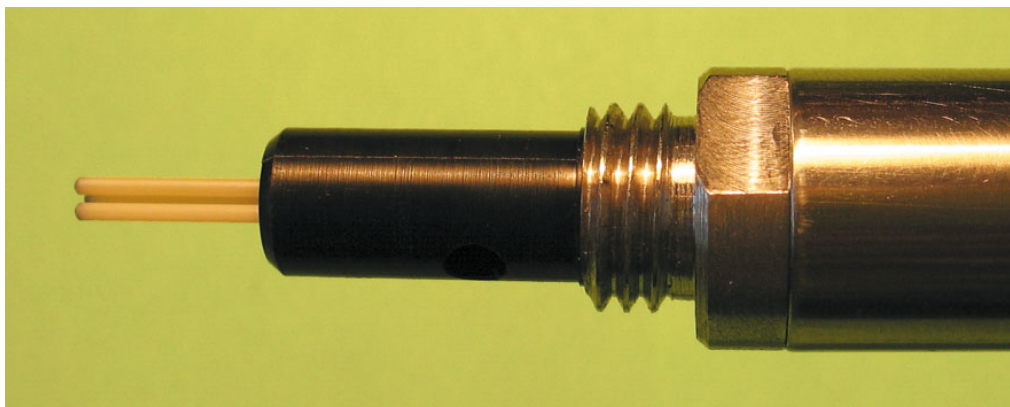
Odbiór ciepła z czujników jest funkcją właściwości gazów, których prędkość jest mierzona, różnicy temperatur pomiędzy czujnikiem i gazem oraz prędkości gazu. Aby skompensować zakłócenia spowodowane zmianami różnic temperatur i właściwości powietrza należy mierzyć jego temperaturę, ciśnienie i wilgotność. Do pomiaru temperatury, która ma największy wpływ na dokładność pomiarów, w omawianym czujniku zastosowano dodatkowy rezystor PT1000. Podczas eksperymentów rejestrowano wartości ciśnienia atmosferycznego, wilgotność i jego temperaturę.

2. Budowa przyrządu i stanowiska pomiarowego

Rysunek czujnika jest pokazany na rysunku (1), a jego zdjęcie na rysunku (2), a uproszczony schemat ideowy jest pokazany na rysunku (3). Na rysunku (4) został pokazany przykładowy opływ powietrza wokół czujnika.



Rys. 1. Rysunek czujnika bez osłony



Rys. 2; Zdjęcie czujnika

Wzmacniacz W_p , którego wzmocnienie jest większe niż milion wzmacnia różnicę napięć U_1 i U_o zasilając swoim napięciem wyjściowym połączone w szereg: rezystor R_I oraz trzy rezystory PT 100. Ze względu na bardzo duże wzmocnienie wzmacniacza W_p różnica pomiędzy napięciami U_1 i U_o jest bardzo mała i można ją pominąć, przyjmując, że $U_1 = U_o$. W miarę wzrostu prędkości powietrza czujnik nagrzewany prądem się chłodzi i maleje ich rezystancja. Przy stałym napięciu zasilania U_1 rośnie płynące przez nie prąd.

Występujące na czujnikach PT100 napięcia, wzmocnione przez wzmacniacze W_{p1} , W_{p2} i W_{p3} , na rysunku oznaczone symbolami U_1, U_2, U_3 , razem z napięciem U_I pozwalają wyznaczyć wektor prędkości.

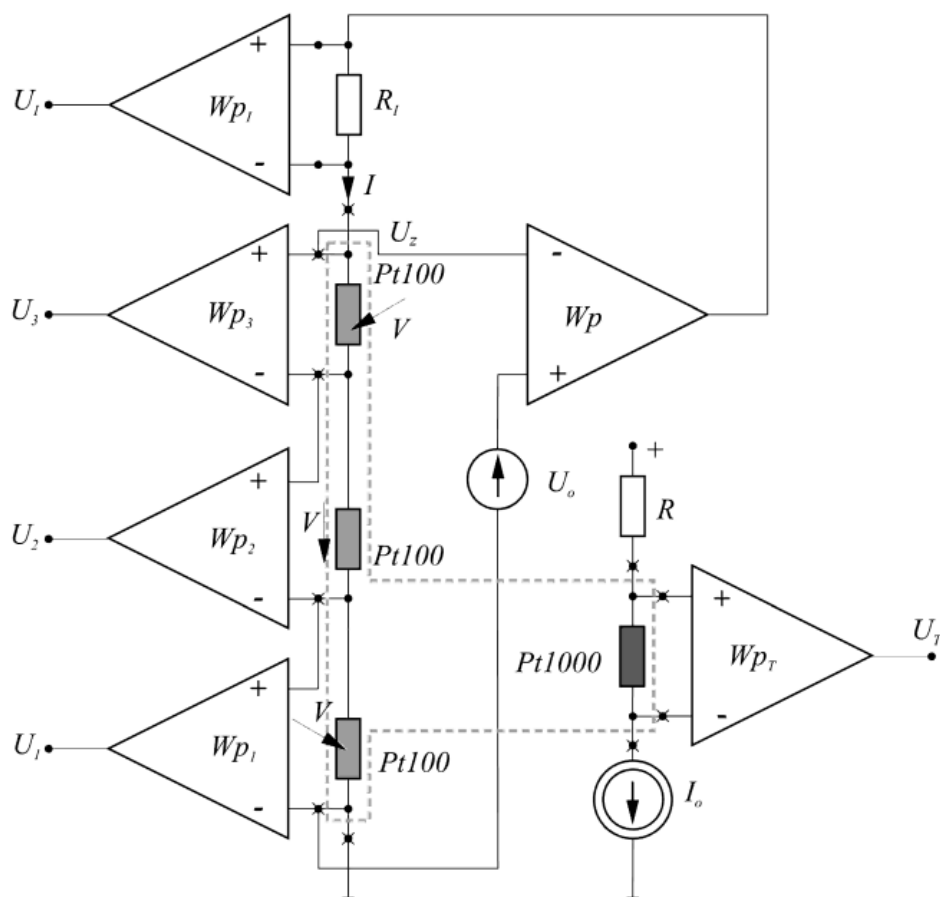
Aby to było możliwe konieczne jest wyznaczenie charakterystyk kątowych termoelementu dla różnych prędkości.

Czujnik PT1000 zasilany ze źródła prądowego I_0 służy do pomiaru temperatury napływającego powietrza.

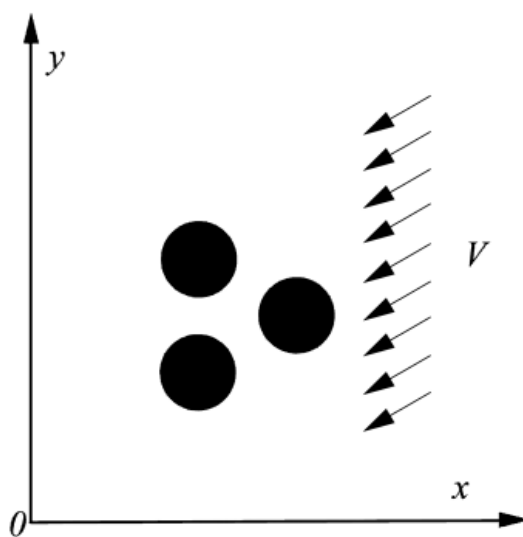
3. Wzorcowanie termometru czujnika

Wzorcowanie termometru czujnik przeprowadzono w piecu OCEANUS 580 z szacowaną niepewnością 0.3°C w nieruchomym powietrzu. Jego charakterystykę opisuje wzór:

$$T = 203.993 U_T - 264.953 \quad (1)$$



Rys. 3. Uproszczony schemat termoanemometru

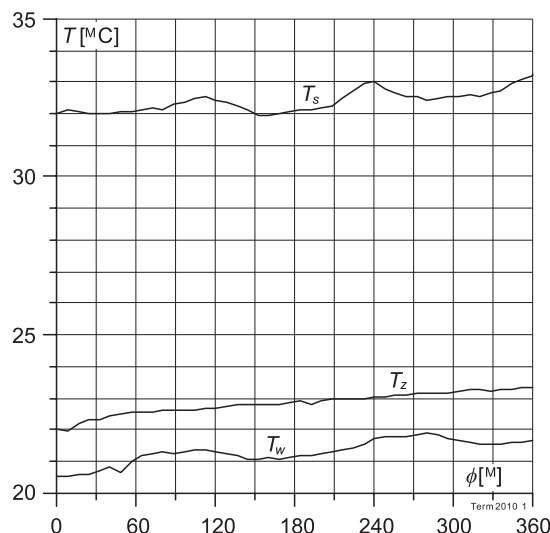


Rys. 4. Przykład opływu powietrza wokół czujnika

4. Eksperymenty w tunelu

Podczas eksperymentów mierzono na zewnątrz tunelu ciśnienie, temperaturę i wilgotność. W czasie prowadzenia eksperymentu zmiany ciśnienia atmosferycznego wynosiły 0.14%, temperatury około 1.2°C a wilgotności względnej rzędu 2%. Zmienność liczby Reynoldsa wywołana tymi zmianami nie powinna być większa niż 0.5%. Przyjmując w pierwszym przybliżeniu pierwiastkową zależność odbioru ciepła od liczby Reynoldsa, zmienność mocy zasilającej czujnik (prądu) można oszacować na około 0.3%. W tunelu

aerodynamicznym mierzono temperaturę powietrza termometrem wbudowanym w czujnik. Ponad to z pomiaru prądu płynącego przez trzy czujniki PT100 (napięcie $U_I/400$) składające się na czujnik prędkości oraz z napięcia je zasilającego $U_z = 6.21659$ V, wyznaczono ich średnią temperaturę. Wykresy tych temperatur znajdują się na rysunku (5).

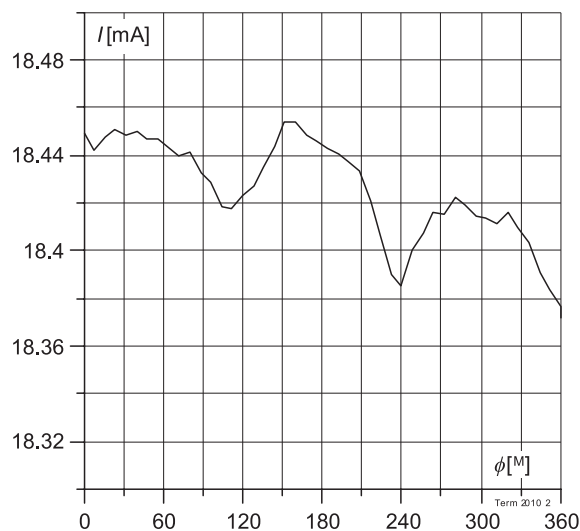


Rys. 5. Wykresy temperatur na zewnątrz i wewnątrz tunelu aerodynamicznego, oraz średnia temperatura trzech termometrów PT100 (składających się na czujnik prędkości), w funkcji kąta obrotu czujnika przy prędkości powietrza 1 m/s.
 T_s – średnia temperatura czujnika prędkości, T_w – temperatura wewnątrz tunelu, T_z – temperatura na zewnątrz tunelu

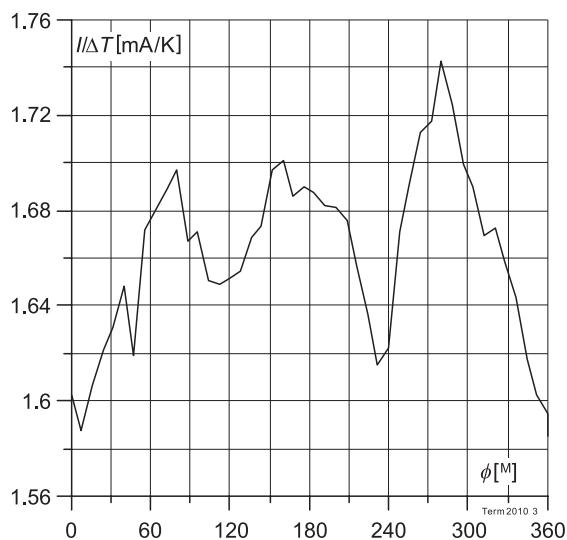
Jak z tego rysunku widać wszystkie temperatury rosną razem z kątem obrotu. Jest to wynikiem nagrzewania się powietrza wywołanego pracą wentylatora tunelu.

Celem wyznaczenia kierunku wektora prędkości mierzono napięcia występujące na czujnikach prędkości (U_1, U_2, U_3).

Informację o wektorze prędkości daje moc oddawana przez wszystkie trzy termometry PT100 czujnika prędkości oraz napięcia na nich występujące. Ponieważ czujnik pracuje w układzie termooanemometru stałonapięciowego to informacją o oddawanej mocy jest zasilający go prąd. Wykres prądu w funkcji kąta



Rys. 6. Wykres prądu zasilającego nieosłonięty czujnik termooanemometru dla prędkości 1 m/s



Rys. 7. Wykres prądu płynącego przez nieosłonięty czujnik prędkości przypadającego na jeden stopień różnicy temperatur pomiędzy czujnikiem prędkości i powietrzem dla prędkości 1 m/s

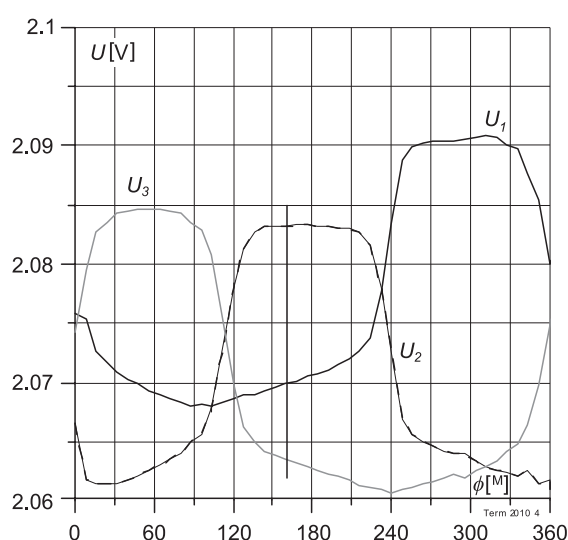
obrotu jest pokazany na rysunku (6). Widać na nim zmienność prądu z kątem obrotu i różnicy temperatur pomiędzy czujnikiem prędkości i temperatury powietrza w tunelu.

Oddawana moc przypadająca na jeden stopień różnicy temperatur, pomiędzy czujnikiem prędkości i powietrzem, powinna być od tej różnicy zależna w znacznie mniejszym stopniu. Jest to pokazane na rysunku (7).

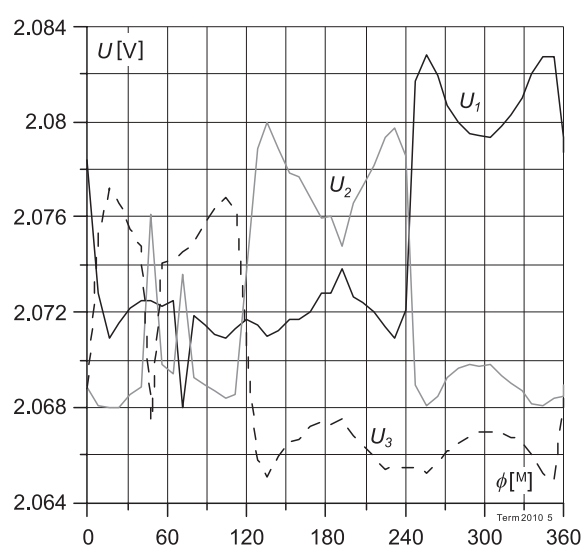
Wykresy napięć nie osłoniętego czujnika w funkcji kąta obrotu, występujące na poszczególnych czujnikach PT100 czujnika prędkości, są pokazane na kolejnych rysunkach. Na rysunku (8) dla prędkości 1 m/s a na rysunku (9) dla prędkości 2,67 m/s.

Analiza rysunku (8) pokazuje możliwość wyznaczania kierunku i zwrotu wektora prędkości. Łącznie z charakterystyką prądową ale z uwzględnieniem zależności prądu od kąta obrotu można również wyznaczyć moduł wektora prędkości.

Wykresy napięć sporządzone na rysunku (9) pokazują, że przy większych prędkościach kierunku i zwrotu wektora prędkości nie da się wyznaczyć.



Rys. 8. Wykresy napięć występujących na rezystorach PT100 nie osłoniętego czujnika prędkości dla prędkości 1 m/s w funkcji kąta obrotu



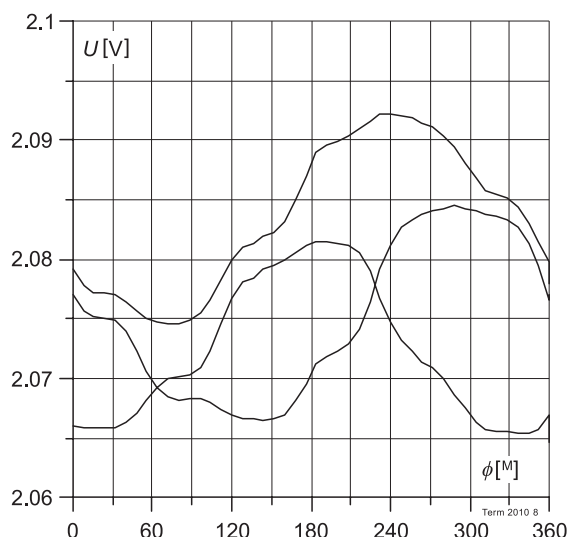
Rys. 9. Wykresy napięć występujących na rezystorach nie osłoniętego czujnika prędkości dla prędkości powietrza 2.67 m/s

Rozwiązaniem tego problemu może być zmniejszenie prędkości występującej wokół czujnika przez zastosowanie otaczającej go siatki. Oczywiście zostanie w ten sposób zmniejszona czułość. Wykresy napięć występujące na osłoniętych czujnikach PT100 przy prędkości 5 m/s pokazane są na rysunku (10).

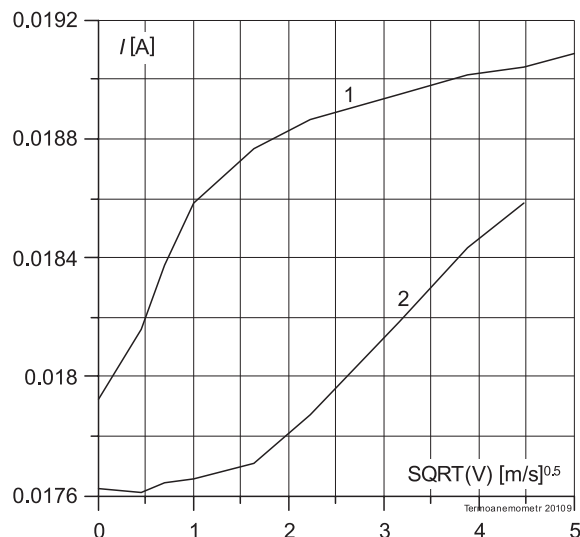
Dla oceny straty czułości na rysunku (11) zostały pokazane wykresy prądów zasilających osłonięte i nie osłonięte czujniki PT100 w funkcji pierwiastka z prędkości powietrza.

5. Wnioski i komentarz

Przeprowadzone eksperymenty oraz analiza literatury pokazują, że jest możliwe zbudowanie termoanemometru 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 już uzyskanych wyników, wzorcowanie takich termoanemometrów wydaje się być zagadnieniem dosyć skomplikowanym i niewątpliwie bardzo pracochłonnym i z tego powodu musi być w znacznym stopniu zautomatyzowane.



Rys. 10. Wykresy napięć na osłoniętych czujnikach PT100 termooanemometru dla prędkości 5 m/s



Rys. 11. Wykresy prądu w funkcji pierwiastka z prędkości.
 • Krzywa 1, czujniki PT100 nie są osłonięte;
 • Krzywa 2, czujniki PT100 są osłonięte

Cytowany opis patentowy zawiera informację o istnieniu układu elektronicznego bez jego opisu. Brak w opisie informacji o potrzebie pomiaru parametrów gazu, którego prędkość jest mierzona oraz wyznaczania oddawanej przez czujniki mocy. Konieczność pomiaru parametrów gazu i wymienianej mocy wynika z wykresu zamieszczonego na rysunku (6), na którym widoczne są zmiany prądu płynącego przez czujniki w funkcji kąta obrotu czujnika. Po uwzględnieniu wykresów z rysunku (5) oczywisty jest pomiar temperatury gazu. Wymianę ciepła pisuje liczba Nusselta, której głównym składnikiem jest liczba Reynoldsa zależna od prędkości, temperatury i gęstości gazu, a ta z kolei jest również funkcją ciśnienia.

Praca została wykonana w roku 2010 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Hobler T. *Ruch ciepła i wymienniki*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1968.
- Ligeza P. Patent nr PI 205756, 2010.
- Socha K. *Termooanemometryczna metoda wyznaczania modułów składowych oraz zwrotu wektora prędkości w dwuwymiarowych przepływach gazu*, Archives of Minig Science, Seria: Monografia, Numer 5, Kraków 2009.
- Wiśniewski S. *Wymiana ciepła*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979.

Hot-wire anemometer for finding the velocity vector on the plane

Abstract

The paper provides a description of a hot-wire anemometer incorporating three cylindrical sensors PT100 connected in series, arranged parallel at the vertexes of an equilateral triangle and connected in a constant-voltage thermoanemometer circuit. The circuit comprising sensors arranged in parallel allows for finding the direction of the velocity vector in the plane normal to them.

Keywords: thermoanemometry