Badanie charakterystyk statycznych termoanemometrycznych czujników włóknowych

Paweł Jamróz, Katarzyna Socha, Paweł Ligęza, Elżbieta Poleszczyk, Andrzej Rachalski, Małgorzata Zięba

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono złożony proces wzorcowania jednowłóknowych sond termoanemometrycznych, w wyniku którego uzyskiwane są parametry linearyzatorów dla poszczególnych kanałów pomiarowych oraz ich charakterystyki statyczne. Pokazano stanowisko i oprogramowanie pozwalające na badanie wpływu zmian czynników środowiskowych na charakterystyki przetwarzania sond termoanemometrycznych.

Słowa kluczowe: termoanemometr, charakterystyka statyczna

1. Wstęp

Termoanemometria należy do grupy pomiarów złożonych, których sygnał pomiarowy powiązany jest nie tylko z elementem czynnym (termorezystorem: włóknem, Pt100, półprzewodnikowym), ale również jest zależny od własności układu elektronicznego stanowiącego razem z czujnikiem kanał pomiarowy. Szczególnym przypadkiem termoanemometrii są termoanemometry włóknowe w których rolę elementu pomiarowego stanowi włókno o średnicy od kilku do kilkunastu µm. Z uwagi na swoje ograniczenia związane z wytrzymałością i duże zalety obejmujące pomiary wektora prędkości w szybkozmiennych przepływach zbliżone do pomiarów punktowych, znalazły one zastosowanie szczególnie w badaniach laboratoryjnych w ściśle określonych i kontrolowanych warunkach. Na przestrzeni ostatnich lat przyrządy te są coraz częściej wykorzystywane do badań nad różnego rodzaju typami zjawisk występujących w przepływach. Na podstawie wyników z takich pomiarów wyciągane są między innymi wnioski związane z własnościami przepływów w procesie przewietrzania wyrobisk kopalnianych (Skotniczny i in., 2014). Zastosowanie takich przyrządów poza laboratorium, w szczególności w środowiskach znacznie różniących się pod kątem właściwości fizycznych i składu chemicznego mieszaniny powietrza i innych gazów od parametrów powietrza w których przyrządy te są wzorcowane wymusza określenie wpływu wielu dodatkowych czynników na charakterystyki statyczne termoanemometrycznych układów pomiarowych.

2. Charakterystyka przetwarzania przetwornika termoanemometrycznego

W pomiarach prędkości przepływu różnych mediów, włóknowymi metodami termoanemometrycznymi, rolę elementu czynnego bezpośrednio oddziałującego z mierzoną wielkością fizyczną stanowi sonda pomiarowa, wyposażona w włókno pomiarowe o średnicach kilku mikrometrów. Włókno rezystancyjne umieszczone jest na wspornikach i połączone z układem elektronicznym, stanowiącym jednocześnie system zasilania włókna i generującym sygnał pomiarowy (Ligęza, 2001). Uzyskanie wyniku pomiaru prędkości wiąże się z przekształceniem wielkości elektrycznej związanej ze spadkiem napięcia na grzanym włóknie na estymatę wartości mierzonej wielkości fizycznej zgodnie z zależnością opisującą bilans energetyczny włókna (1).

$$\frac{E_w^2}{R_w} = \pi l \lambda N u (T_w - T_a) \tag{1}$$

gdzie:

 E_w – spadek napięcia na włóknie [V],

 R_w – rezystancja grzanego włókna [Ω],

- *l* długość włókna pomiarowego [m],
- λ współczynnik przewodzenia ciepła medium [W/m·K],
- Nu liczba Nusselta [-],
- T_w temperatura grzanego włókna [K],
- T_a temperatura medium [K].

W zależności od rodzaju przepływu i jego prędkości liczba Nusselta może być opisana półempirycznymi zależnościami wykorzystującymi kryterialne liczby Reynoldsa, Prandtla, Macha, Grashofa oraz Knudsena. Dla najczęściej wykonywanych pomiarów, tj. z uwzględnieniem włókna umieszczonego w poddźwiękowym przepływie gazu, wykorzystuje się modele liczby *Nu* korzystające z kryterialnej liczby Prandtla Pr i Reynoldsa Re. Odpowiada to przepływom, w których dominujące znaczenie ma wymiana ciepła poprzez konwekcję wymuszoną. Jedną z często stosowanych zależności jest formuła podana przez Kramersa (1946):

$$Nu = 0.42 \operatorname{Pr}^{0.2} + 0.57 \operatorname{Pr}^{0.33} \operatorname{Re}^{0.5}$$
(2)

Wartość liczby Nu ściśle związana jest z prędkością przepływającego płynu v wokół włókna, jego gęstością ρ , współczynnikiem lepkości dynamicznej μ , wymiarem charakterystycznym włókna d, ciepłem właściwym płynu c_p , współczynnikiem przewodnictwa ciepła medium λ zgodnie z zależnościami (3) i (4).

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{3}$$

$$\Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \tag{4}$$

Po uwzględnieniu zależności (3) i (4) wzór (1), z dużą dokładnością, może być przybliżony następującym modelem:

$$\frac{E_w^2}{R_w} = (A + Bv^N) (T_w - T_a)$$
⁽⁵⁾

gdzie:

v – prędkość przepływającego medium, A, B, N – współczynniki modelu.

Funkcja (5) stanowi model charakterystyki przetwarzania przetwornika termoanemometrycznego, dla którego w trakcie wzorcowania wyznaczane są współczynniki *A*, *B* oraz *N*, w określonych warunkach środowiskowych i dla kolejnych punktów odpowiadających różnym rzeczywistym prędkością przepływu.

Warunki w których przeprowadzane jest wzorcowanie zazwyczaj różnią się jednak od warunków, w których wykonywane są pomiary. Analizując zależności (1-4) można zauważyć, że charakterystyka przetwornika termoanemometrycznego opisana zależnością (5) jest nie tylko funkcją prędkości przepływu, ale również jest wrażliwa na zmianę warunków środowiskowych w stosunku do tych, które były podczas wzorcowania. W szczególności na uwagę zasługują te, które zmieniać się mogą w sposób znaczący, tj. temperatura i gęstość (ciśnienie, temperatura, wilgotność płynu omywającego włókno).

Na przestrzeni lat wielu badaczy wykonywało analizy wrażliwości charakterystyki sygnału wyjściowego termoanemometru w funkcji prędkości przepływu dla różnych typów termoanemometrów lub ich modeli. Literatura przedmiotu operuje na badaniach modelowych z wykorzystaniem liczb kryterialnych i odnosi się do modelu włókna. W badaniach eksperymentalnych wykorzystywane są ściśle określone układy pomiarowe, a charakterystyki generowane dla nich podawane są w postaci napięcia na włóknie w funkcji prędkości przepływu. W praktyce niejednokrotnie mamy do czynienia z innymi, bardziej złożonymi konstrukcjami systemów pomiarowych, których sposób działania opisany może być jedynie przy pomocy nieliniowych układów równań różniczkowych, dla których możliwe są jedynie rozwiązania numeryczne przy określonych założeniach. Dlatego konieczne stają się badania eksperymentalne powstających układów pomiarowych.

3. Stanowisko pomiarowe do badania czynników wpływających na charakterystykę termoanemometru

Badanie charakterystyk sond termoanemometrycznych wymaga zestawienia stanowiska wzorcowego, generującego przepływy o znanych parametrach. W tym celu wykorzystuje się tunele aerodynamiczne. W 2013 r. w IMG PAN powstał tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi (Bujalski i in., 2013) – rysunek 1a). Konstrukcja tego tunelu umożliwia między innymi badania anemometrycznej aparatury pomiarowej. Charakteryzuje się on zakresem generowanych prędkości przepływu od 0.1 do 60 m/s o intensywności turbulencji < 0,5%.

Wykorzystanie tunelu do badań charakterystyk statycznych sond termoanemometrycznych wymaga wyposażenie go we wzorcowy system do pomiaru prędkości przepływu.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe - tunel a) komora pomiarowa, b) układ sond i statyczna rurka Pitota

3.1. Pomiar prędkości wzorcowej

W celu określania prędkości wzorcowej wykorzystana została statyczna rurka Pitota o współczynniku k = 1. Rurka umieszczona została w komorze pomiarowej w przekroju pomiarowym, znajdującym się bezpośrednio przed przekrojem, w którym umieszczano badane sondy włóknowe – rysunek 1b).

Prędkość wzorcowa określana była zgodnie z zależnością:

$$v_r = k \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{\frac{2\overline{\Delta p}}{\rho}} \tag{6}$$

gdzie:

 v_r – prędkość przepływu medium w miejscu położenia rurki [m/s],

k – współczynnik wzorcowania rurki spiętrzającej,

 $(1 - \varepsilon)$ – współczynnik rozprężenia,

- Δp różnica ciśnień całkowitego i statycznego w rurce [Pa],
 - ρ gęstość medium [kg/m³].

Gęstość powietrza wilgotnego wyznaczono jako sumę gęstości powietrza suchego i gęstości pary wodnej w oparciu o zależność:

$$\rho = \frac{p - \frac{\varphi E}{100}}{R_s T_a} + \frac{\frac{\varphi E}{100}}{R_p T_a}$$
(7)

gdzie:

- p ciśnienie atmosferyczne [Pa],
- φ wilgotność względna [%],
- E prężność pary wodnej nasyconej [Pa],
- R_s stała gazowa powietrza suchego [J·kg⁻¹·K⁻¹],
- R_p stała gazowa pary wodnej [J·kg⁻¹·K⁻¹],
- \dot{T}_a temperatura powietrza [K].

Prężność pary wodnej nasyconej wyznaczono z empirycznego wzoru (Alduchov i Eskridge, 1996):

$$E = 6.1094 \cdot e^{\frac{17.625 \cdot t}{243,04 + t}}$$
(8)

gdzie: *t* – temperatura powietrza [°C].

Do pomiarów wzorcowej prędkości przepływu wykorzystano:

- przetwornik ciśnienia Druck LPM serii 9000 o zakresie do 20 mbar pomiar ciśnienia różnicowego,
- przetwornik ciśnienia Druck RPT 410 o zakresie 600 : 1100 hPa pomiar ciśnienia atmosferycznego,
- przetwornik temperaturowy TURC TTM050C o zakresie –50 : 50°C pomiar temperatury powietrza Class A = ±(0.15 + 0.002* t),
- przetwornik wilgotności RF-01N pomiar wilgotności powietrza ±2%.

3.2. Termoanemometr

W praktyce pomiarowej wykorzystywane są zarówno mostkowe jak i bezmostkowe układy pomiarowe. Jednym z głównie wykorzystywanych układów pomiarowych w Pracowni Metrologii Przepływów jest termoanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stałotemperaturowego (Ligęza, 2003).

Moduł ten pozwala w szczególności na pomiary termometryczne w układzie stałoprądowym, pomiary anemometryczne w układzie stałotemperaturowym. Dodatkowo posiada funkcje związane z testowaniem sond pomiarowych, takie jak zadawanie poziomu nagrzania włókna czy rezystancji pracy włókna.



Rys. 2. Termoanemometr stałotemperaturowy CCC 2002

Prezentowany układ charakteryzuje się czteroprzewodowym systemem zasilania włókna pomiarowego o rozdzielonym obwodzie prądowym i napięciowym, co eliminuje wpływ rezystancji przewodów łączących termoanemometr z sondą pomiarową. Układ wyposażony został w trzy komplety po cztery jednowłóknowe sondy pomiarowe o średnicach włókien odpowiednio 3, 5 i 8 μm.

3.3. Integracja systemu pomiarowego

System pomiarowy sterowany jest z wykorzystaniem wielofunkcyjnej karty pomiarowej NI USB DAQ 6009, która umożliwia pomiar sygnałów napięciowych oraz sterowanie cyfrowe. W celu realizacji zadania badawczego opracowano oprogramowanie zarządzające systemem termoanemometryczym oraz umożliwiające rejestrowanie danych pomiarowych. Program umożliwiał rejestrację sygnałów pomiarowych maksymalnie z 8 kanałów. Było to uwarunkowane zastosowaną kartą pomiarową i liczbą jej wejść analogowych. Obsługa modułu termoanemometrycznego polegała na pomiarze rezystancji włókna i ustawieniu jego rezystancji pracy oraz załączeniu termoanemometru.

🧠 Konfi	iguracja pracy ter	moanemometru		🍇 Konfiguracja	pracy t	ermoanemometru			
NI USB	CCC2002			NI USB CCC2	2002				
	Trvb weiść	Single Ended 👻				Anemometr	Współczynnik nagrzania	R0	R
				Kanał 1	V		1.6	6.35	10.16
	Kanał 1 🛛 📝	±10.0 -		Kanał 2	V	V	1.6	5.25	8.40
	Kanał 2 📝	±10.0 -		Kanał 3	V	V	1.6	6.25	10.00
	Kanał 3 🔽 Kanał 4 🔽	±10.0 v		Kanał 4	V	V	1.6	5.59	8.94
	Kanał 5 🔽	±10.0 -		Manuatki		178		Domine D0	Lietaw P
	Kanał 6 👿	±10.0 v		vvszystki	e 🔽	V		Pomiar Ru	USIAW R
	Kanał 7 📃	±10.0 •							
	Kanał 8 📃	±10.0 -			N 144-	TECT		1 144 de se	CCC2002
	Wszystkie 📃				> vvrq	12 11251		vvyrącz	CCC2002
	ок			🗳 ок					
				CCC2222 1					
			. 11	CCC2002 włączo	ine				

Rys. 3. Interfejs sterujący podstawowymi funkcjami termoanemometru CCC 2002

W programie zaimplementowano trzy typy pomiarów. Pomiar "oscyloskopowy", umożliwiający ciągłe rejestrowanie danych z zadaną częstotliwością próbkowania, aż do momentu zatrzymania. Pomiar "N-próbek", polegający na jednokrotnym zarejestrowaniu zadanej liczby próbek z zadaną częstotliwością próbkowania. Kolejny typ pomiaru to pomiar "półautomatyczny". W wyniku jego działania uzyskiwany jest jeden punkt pomiarowy, będący uśrednioną wartość sygnału przy ustalonej częstotliwości próbkowania oraz liczbie uśrednianych pomiarów dla konkretnych warunków przepływu, np. zadanej prędkości przepływu. W prezentowanych w artykule badaniach eksperymentalnych właśnie ten tryb pracy był wykorzystywany. Oprócz danych pomiarowych program zapisywał wprowadzane ręcznie parametry środowiskowe, takie jak temperaturę i wilgotność przepływu.



Rys. 4. Interfejs pomiarowy programu do obsługi termoanemometru CCC2002

4. Linearyzacja i wzorcowanie

W klasycznym ujęciu wzorcowanie jest procesem mającym na celu ustalenie relacji pomiędzy wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami wielkości fizycznych, realizowanymi przez wzorzec jednostki miary. Dla wykorzystywanych w Pracowni Metrologii Przepływu termoanemometrów włóknowych proces wzorcowania jest bardziej złożony, gdyż w jego trakcie wyznaczane są również parametry cyfrowego linearyzatora pozwalającego na ustalenie relacji pomiędzy napięciem wyjściowym termoanemometru (sygnałem pomiarowym), a wartościami wskazywanymi przez wzorzec pomiarowy. Proces wzorcowania przyrządu połączony jest zatem z jego adiustacją, w wyniku której otrzymywane są parametry p, q, r w wyniku poszukiwania minimum funkcji (9).

$$\left[\left[(U^2 - p)q\right]^r - v_r\right]^2 = \min$$
(9)

Zależność ta stanowi przekształcenie zależności (5) z uwzględnieniem stałej temperatury nagrzania włókna T_w i temperatury medium $T_{a,0}$ w trakcie całego wzorcowania.

W praktyce pomiarowej wykonywane są pomiary, w wyniku których estymuje się chwilowe wartości prędkości przepływającego medium v_e . Z punktu widzenia osoby wykonującej pomiar, dogodniejsza dla analizy metrologicznej systemu pomiarowego jest liniowa charakterystyka określająca związek pomiędzy poprawną wartością prędkości określaną w trakcie wzorcowania v_r , a odpowiadającymi jej wskazaniami termoanemometru v_e wyznaczanymi na podstawie rejestrowanych napięć zgodnie z zależnością:

$$v_e = \left[(U^2 - p)q \right]^r \tag{10}$$

Z uwagi na to, że proces wzorcowania termoanemometrycznych sond pomiarowych połączony jest z adjustacją tych przyrządów, w wyniku której powinno uzyskiwać się charakterystyki $v_r(v_e)$ w postaci funkcji liniowych o współczynniku nachylenia zbliżonym do wartości jednostkowej i zerowym przesunięciu. Taka postać charakterystyki pozwala na bezpośrednią ocenę odchyleń wskazań wzorcowanego przyrządu od idealnej charakterystyki przetwarzania. Jest ona użyteczna w ocenie czasowej stabilności przyrządu oraz wpływów, jakie na charakterystykę przyrządu posiadają zewnętrzne czynniki, np. zmiany warunków środowiskowych.

Praktyczną stronę wzorcowania prezentuje przykład, w którym wykonano wzorcowanie czterech sond jednowłównowych o średnicach włókien 5 μm i parametrach zamieszczonych w Tabeli 1.

	<i>T</i> ₀ [K]	$R_0\left[\Omega ight]$	$R_w[\Omega]$	<i>T_w</i> [K]
Sonda 1	293,15	6.34	10.14	
Sonda 2	293,15	5.23	8.37	457.04
Sonda 3	293,15	6.24	9.98	457.04
Sonda 4	293,15	5.59	8.94	

Tab. 1. Rezystancje i temperatury poszczególnych sond pomiarowych

Dla tak przygotowanego eksperymentu wykonano wzorcowanie w 8 punktach pomiarowych w zakresie $2 \div 30$ m/s, w trakcie których określono współczynniki linearyzatorów dla każdego z kanałów pomiarowych (Tabela 2).

	р	q	r
Kanał 1/Sonda 1	2.292	0.458	2.357
Kanał 2/Sonda 2	3.197	0.378	2.380
Kanał 3/Sonda 3	2.278	0.455	2.378
Kanał 4/Sonda 4	2.907	0.392	2.391

Tab. 2. Współczynniki funkcji lienearyzujących charakterystyki statyczne sond

Na rysunku 5a) przedstawiono wyniki uzyskane w trakcie wyznaczania parametrów modelu linearyzatora dla poszczególnych sond pomiarowych. Poszczególne symbole odnoszą się do danych pomiarowych, natomiast liniami zaznaczono wyniki estymowane na podstawie wyznaczonej funkcji linearyzatora zgodnie z zależnościami (9), (10).

Na podstawie tak wyznaczonych danych pomiarowych możliwe jest określenie dla każdej z sond charakterystyki statycznej w postaci wykresu zależności $v_r(v_e)$ – rysunek 5b).

W danych warunkach pomiarowych, ściśle związanych z warunkami wzorcowania charakterystyki te pokrywają się z idealnymi charakterystykami przetwarzania. Nieznaczne odchyłki spowodowane mogą być dokładnością dopasowania funkcji linearyzatora (10) do danych pomiarowych.



Rys. 5. Wyniki wzorcowania sond 5 μ m a) charakterystyki v(U) b) charakterystyki $v_r(v_e)$

5. Powtarzalność wzorcowań

Wykorzystanie wzorcowań w badaniach nad charakterystykami statycznymi termoanemometrycznych przyrządów pomiarowych wymaga określenia powtarzalności wykonywanych wzorcowań. Ma to na celu określenie na ile pewna niestacjonarność warunków środowiskowych w tunelu aerodynamicznym, związanych z prędkością, temperaturą, wilgotnością i ciśnieniem statycznym strugi powietrza oraz własności metrologiczne samego przyrządu wzorcowanego posiadają wpływ na zmiany w wyznaczanych charakterystykach tych samych sond pomiarowych. Badanie ma na celu zapewnienie, że obserwowalne zmiany w charakterystykach poszczególnych termoanemometrów nie są powodowane wpływem samej metody wzorcowania, a określonymi zmianami czynników, których wpływ na charakterystyki termoanemometów będzie analizowany. Eksperyment pomiarowy, w wyniku którego określano powtarzalność wzorcowań dla badanego termoanemometru polegał na wykonaniu 10 kolejnych wzorcowań sond o średnicy 5 µm dla ustalonych warunków środowiskowych (przy zachowaniu możliwie niezmiennej temperatury i wilgotności przepływającej strugi powietrza w tunelu i ciśnienia atmosferycznego). W rzeczywistości wzorcowania zostały wykonane w zakresie zmian poprawnie zadawanej prędkości v_r 1,5 ÷ 30 m/s, przy temperaturze strugi powietrza T_a zmieniającej się w zakresie 19.8 ÷ 20.2°C, wilgotności względnej powietrza φ 49,5 ÷ 50,6%, oraz ciśnieniu atmosferycznemu p 988,22 ÷ 988,91 hPa. Współczynniki linearyzatora dla poszczególnych sond pomiarowych wyznaczone zostały w trakcie pierwszego wzorcowania i wykorzystane do wyznaczenia charakterystyk statycznych we wszystkich wzorcowaniach realizowanych w ramach tego eksperymentu. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 6, na którym zamieszczono 10 kolejnych charakterystyk statycznych dla sondy nr 1.



Rys. 6. Sonda nr 1 – 10 kolejnych liniowych charakterystyk statycznych $v_r(v_e)$

Charakterystyki te poddano regresji liniowej i przestawiono w postaci funkcji (11)

$$v_r = k \cdot v_e + l \tag{11}$$

Wartości współczynników nachylenia k oraz przesunięcia l funkcji linearyzującej zamieszczono w tabeli 3.

Nr wzorc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	1.0001	0.9985	0.9994	0.9964	0.9955	0.9951	0.9936	0.9954	0.9956	0.9943
l	-0.0025	0.0302	-0.0060	0.0069	-0.0039	-0.0021	0.0557	0.0368	0.0213	0.0409

Tab. 3. Sonda nr 1 – współczynniki regresji liniowej dla 10-ciu kolejnych wzorcowań

Dla analizowanego przypadku wyznaczono średnie wartości współczynnika nachylenia i przesunięcia wraz z określeniem niepewności rozszerzonej na poziomie ufności około 95% (współczynnik rozszerzenia = 2, rozkład normalny), które wynoszą odpowiednio: $\overline{k} = 0.9964 \pm 0.0014$, $\overline{l} = 0.0177 \pm 0.014$. Pozwoliło to na określenie granic ufności dla przeprowadzanych eksperymentów związanych z wzorcowaniami w możliwie stałych, kontrolowanych warunkach. Wyniki eksperymentu przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Średnia charakterystyka statyczna wraz z przedziałem ufności

Uzyskane wyniki potwierdzają dużą powtarzalność wykonywanych wzorcowań. Wpływ metody wzorcowania oraz obiektu wzorcowanego jest jednak zauważalny i musi być brany pod uwagę w trakcie badań nad charakterystykami statycznymi sond termoanemometrycznych.

6. Podsumowanie

Badania charakterystyk statycznych termoanemometrów włóknowych stanowią złożony proces pomiarowy związany z wielokrotnym wzorcowaniem poszczególnych kanałów pomiarowych układu termoanemometrycznego. Aby wyniki analiz były wiarygodne konieczne jest poznanie właściwości metrologicznych samego stanowiska wzorcowego i wpływu powtarzania przyjętej procedury wzorcowania na uzyskiwane charakterystyki statyczne. Na podstawie przedstawionych wyników badań możliwe będzie miarodajne określenie wpływu na charakterystykę statyczną termoanemometru poszczególnych czynników związanych ze zmianami parametrów fizycznych i składu chemicznego płynu omywającego włókno pomiarowe, w stosunku do parametrów płynu, w którym włókno było pierwotnie wzorcowane. Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Alduchov O.A., Eskridge R.E., 1996: Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. Journal of Applied Meteorology 35(4): 601-609.
- Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J., 2013: *Tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 15(1-2): 65-74.
- Collis D.C., Williams M.J., 1959: *Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers*. Journal of Fluid Mechanics 6(3): 357-384.

Kramers H., 1946: Heat transfer from spheres to flowing media. Physica, 12, pp. 61-80.

- Skotniczny P., Jamróz P., Ligęza P., Poleszczyk E., 2014: Wielokanalowy system termoanemometryczny do wyznaczania zaawansowanych parametrów przepływowych powietrza w wyrobisku górniczym. Wybrane problemy eksploatacji pokładów węgla kamiennego ze szczególnym uwzględnieniem zagrożeń aerologicznych. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
- Ligęza P., 2001: Układy termoanemometryczne-struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe. Seria "Rozprawy Monografie" 98. Kraków: AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne.
- Ligęza P., 2003: Sterowany komputerowo termoanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stałotemperaturowego. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 5(2): 237-244.

TAn analysis of the static characteristics of the hot-wire anemometers

Abstract

The article presents the hot-wire anemometers calibrating process, which assumes determining the linearization coefficients for each of the measurement channel of the hot-wire measurement system. As a result of the calibration, the static characteristics of the hot-wire sensors are obtained. Received characteristic is a linear relationships between the reference velocity and the velocity indicated by the calibrated anemometers. Such type of characteristics, in opposite to common voltage/velocity form, allows for the comparing them, when its obtained in a different environmental conditions.

Keywords: hot-wire anemometer, static characteristic