

Algorytmiczna optymalizacja pasma przenoszenia anemometru z grzanyym włóknem

PAWEŁ LIGĘZA 

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

Streszczenie

Optymalizacja pasma przenoszenia anemometrów z grzanyym włóknem stanowi jedno z wyzwań metrologii przepływów turbulentnych i pulsacyjnych. W tym celu stosowana jest miniaturyzacja czujników zmniejszająca inercję termiczną elementu pomiarowego, struktura układu elektronicznego i parametry jego elementów podlegają optymalizacji, rozwijane są metody i algorytmy przetwarzania sygnału wyjściowego. W typowych anemometrach z grzanyym włóknem wyjściowy sygnał napięciowy przetwarzany jest na sygnał mierzonej prędkości z zastosowaniem statycznej funkcji wzorcowania. W artykule opisano algorytm pomiarowy wykorzystującą równocześnie dwa sygnały pomiarowe z anemometru. Są to sygnały proporcjonalne do napięcia i prądu czujnika. Na podstawie tych sygnałów i dynamicznego modelu czujnika z parametrami wzorcowania odtwarzany jest przebieg mierzonej prędkości przepływu.

Słowa kluczowe: anemometr z grzanyym włóknem, przepływy turbulentne, przepływy pulsacyjne, optymalizacja pasma przenoszenia, model dynamiczny

1. Wprowadzenie

Anemometry kalorymetryczne z nagrzanym elementem pomiarowym są przeznaczone przede wszystkim do pomiaru fluktuacji prędkości w przepływach turbulentnych i pulsacyjnych. Ważne są tu następujące właściwości metrologiczne tych przyrządów:

- mała inercja termiczna czujnika,
- znikoma inwazyjność czujnika,
- elektryczny sygnał wyjściowy,
- szeroki zakres pomiaru prędkości,
- szerokie pasmo częstotliwościowe,
- niskie szumy własne.

Właściwości te powodują, że anemometryczne metody pomiarowe wykorzystujące czujniki termiczne są powszechnie stosowane i rozwijane [1]. Obszar zastosowania anemometrów z grzanyym włóknem implikuje ciągłe prace nad optymalizacją właściwości dynamicznych tych przyrządów. Jednym z prekursorów tych prac był Freymuth [2], który zaproponował teorię dynamicznego układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym dla anemometrów hot-wire. Badania pasma przenoszenia takiego układu kontynuował Davis [3]. Metodę wyznaczania pasma przenoszenia anemometru elektrycznym testem prostokątnym zaproponował Freymuth [4]. Badania złożonych systemów anemometrycznych, pozwalające określić czynniki decydujące o paśmie przenoszenia, prowadził Watmuff [5], wykorzystując modelowanie komputerowe. Saddoughi i Veeravalli [6] wykazali, że szumy własne układu ograniczają pasmo przenoszenia anemometru w zakresie wysokich częstotliwości. Analizę efektów dynamicznych rzędu wyższego niż trzeci przedstawił Freymuth [7]. Bezwładność termiczną wsporników włókna czujnika na pasmo przenoszenia badał Payne [8] oraz Li [9]. Li [10] prowadził także badania częstotliwości granicznej układu elektronicznego anemometru, oraz stosował różne sygnały testujące do wyznaczenia pasma przenoszenia [11]. Ligęza [12-14] wprowadził koncepcję

zastosowania w anemometrze regulatora adaptacyjnego, natomiast Fan et al. [15] opisali technologię MEMS / NEMS konstrukcji czujników anemometrycznych. Pasma częstotliwościowe anemometrów w pomiarach bezpośrednich wyznaczyli Hutchins et al. [16]. Dalsze badania w zakresie optymalizacji pasma przenoszenia anemometrów prowadzili Fan et al. [17]. W pracy [18] Diribarne et al. opisali czujnik z włóknem nadprzewodzącym do zastosowań kriogenicznych. Rozwój metod testowania i optymalizacji pasma przenoszenia anemometru przedstawił Ligęza [19]. Z analizy przedstawionych prac wynika, że optymalizacja pasma przenoszenia anemometrów termicznych realizowana jest w czterech płaszczyznach:

- (1) minimalizacja inercji termicznej i wymiarów czujnika,
- (2) optymalizacja elektronicznego układu anemometru,
- (3) dobór optymalnych elementów składowych układu,
- (4) opracowanie i optymalizacja algorytmów przetwarzania sygnału.

W artykule przedstawiono koncepcję nowego algorytmu pomiarowego przetwarzania sygnału wyjściowego z układu anemometru z grzaniem włóknem. Wykorzystuje on równocześnie dwa sygnały pomiarowe z anemometru. Są to sygnały proporcjonalne do napięcia i prądu czujnika. Na podstawie tych sygnałów i dynamicznej funkcji wzorcowania odtwarzana jest mierzona prędkość przepływu przy wykorzystaniu dynamicznego modelu czujnika.

2. Kalorymetryczny anemometr z grzaniem włóknem

Kalorymetryczne anemometry z grzaniem włóknem, nazywane termoanemometrami, przeznaczone są do pomiaru prędkości przepływu płynów (gazów i cieczy) [20]. Aktywnym elementem pomiarowym jest tu rezystancyjny przetwornik temperatury. Jest to element wykonany z przewodnika lub półprzewodnika, którego rezystancja zmienia się w sposób istotny wraz ze zmianą jego temperatury. Typowy czujnik anemometru kalorymetrycznego to cienki drut wolframowy lub platynowy rozpięty pomiędzy igłowymi wspornikami. Wsporniki doprowadzają sygnał elektryczny i stanowią konstrukcję mocowania włókna. Pomiar prędkości przepływu płynu za pomocą czujnika dokonywany jest w ten sposób, że czujnik umieszczony jest badanym przepływie płynu, a prąd elektryczny płynący przez czujnik rozgrzewa go do temperatury istotnie wyższej od temperatury płynu. Ilość ciepła odbieranego z czujnika przez przepływ jest zależna od prędkości przepływu płynu. Sposób pomiaru prędkości czujnikiem anemometrycznym polega na wyznaczeniu prędkości przepływu płynu pośrednio, poprzez pomiar strumienia ciepła odbieranego przez przepływ. Metoda ta jest wykorzystywana przede wszystkim do pomiarów przepływów szybkozmiennych w szerokim zakresie fluktuacji prędkości.

W klasycznych anemometrach z grzaniem włóknem czujnik zasilany jest prądem elektrycznym z elektronicznego układu ustalającego warunki pracy czujnika. W układzie tym mierzony jest jeden z elektrycznych sygnałów wyjściowych, a z jego wartości wyznaczana jest mierzona prędkość przepływu płynu na podstawie statycznej zależności funkcyjnej. Postać tej funkcji wyznaczana jest w procesie wzorcowania anemometru. Proces ten polega na umieszczeniu czujnika anemometrycznego w przepływie płynu o zadawanych prędkościach wzorcowych i wyznaczeniu, w stanie ustalonym, statycznej zależności funkcyjnej elektrycznego sygnału wyjściowego z anemometru od zadawanej prędkości przepływu. Podczas pomiarów wykorzystuje się funkcję odwrotną do funkcji uzyskanej w procesie wzorcowania. Jako elektroniczne układy anemometryczne typowo stosowane są układy w których, w stanie ustalonym, jeden z parametrów w przybliżeniu utrzymywany jest na stałym poziomie. Znany jest układ stałonapięciowy, stałoprądowy oraz stałorezystancyjny (stałotemperaturowy) [20]. Układy te utrzymują dany parametr zasilania czujnika, a więc napięcie, prąd lub rezystancję czujnika na w przybliżeniu stałym, zadanim poziomie. Elektrycznym sygnałem wyjściowym z układu termoanemometrycznego jest najczęściej napięcie proporcjonalne do napięcia lub prądu czujnika.

Termoanemometry stosowane są przede wszystkim do pomiarów przepływów szybkozmiennych w szerokim zakresie fluktuacji prędkości. Dlatego istotnym parametrem jest możliwie szerokie pasmo przenoszenia fluktuacji prędkości układu termoanemometrycznego. Szerokość tego pasma można zwiększyć stosując zoptymalizowany układ zasilania czujnika, na przykład układ stałotemperaturowy, który dzięki zastosowaniu w układzie elektronicznym sprzężenia zwrotnego o dobranych parametrach pozwala na kształtowanie i optymalizację pasma przenoszenia termoanemometru. Szerokość pasma przenoszenia można również zwiększyć stosując czujniki termoanemometryczne o zminimalizowanej inercji termicznej, a więc na przykład wykonane z jak najcieńszego drutu. Jednak te metody poszerzania pasma przenoszenia mają fizyczne ograniczenia. Cechą wspólną stosowanych dotychczas sposobów pomiaru prędkości czujnikiem

termoanemometrycznym jest pomiar chwilowej wartości prędkości poprzez pomiar chwilowej wartości pojedynczego sygnału elektrycznego z układu i przypisanie jej prędkości mierzonej na podstawie statycznej funkcji wzorcowania. Ten sposób powoduje ograniczenie możliwego do uzyskania pasma przenoszenia termooanemometru ze względu na to, że układ pomiarowy, stanowiący obiekt dynamiczny, nie osiąga w chwili pomiaru stanu ustalonego, takiego jak w procesie wzorcowania. Pomiar jest więc obciążony błędem dynamicznym wynikającym z różnicy stanów układu pomiarowego w czasie wzorcowania i pomiaru.

3. Algorytm optymalizacji pasma przenoszenia anemometru

Czujnik z grzanym włóknem opisuje dynamiczny model matematyczny w postaci [21]:

$$I^2 R = I_K^2 \left[1 + \left(\frac{V}{V_K} \right)^{0.5} \right] (R - R_0) + I_K^2 \tau_K \frac{dR}{dt} \quad (1)$$

gdzie:

- I – prąd czujnika,
- R – rezystancja nagrzanego czujnika,
- R_0 – rezystancja czujnika w temperaturze medium,
- V – prędkość przyływu medium,
- I_K, V_K, τ_K – parametry modelu,
- t – czas.

Lewa strona modelu (1) to moc prądu ogrzewającego czujnik. Prawa strona opisuje strumień ciepła odbierany przez przepływ na drodze konwekcji oraz magazynowany w elemencie pomiarowym czujnika. Znaczenie parametrów modelu oraz sposób ich wyznaczania na drodze eksperymentalnej opisano w pracy [22]. Na podstawie modelu (1) możemy wyznaczyć mierzoną prędkość przepływu v :

$$v = V_K \left(\frac{\frac{I^2}{I_K^2} R - \tau_K \frac{dR}{dt}}{R - R_0} - 1 \right)^2 \quad (2)$$

W równaniu (2) występują dwie wielkości elektryczne, prąd i rezystancja czujnika, które są powiązane z napięciem na czujniku prawem Ohma:

$$R = \frac{U}{I} \quad (3)$$

Zgodnie z równaniami (2) i (3) mierząc przebieg napięcia i prądu czujnika oraz wyznaczając przebieg zmian rezystancji czujnika i jej pochodnej na podstawie zależności (2) możliwe jest wyznaczenie przebiegu zmian prędkości przepływu w czasie. Taka procedura stanowi proponowany algorytm przetwarzania sygnałów z układu anemometru.

W dotychczas stosowanej, klasycznej metodzie pomiarowej dla układu stałotemperaturowego, przyjmując prąd czujnika jako sygnał wyjściowy oraz zakładając stałą rezystancję czujnika, z równania (2) otrzymujemy mierzoną prędkość przepływu jako:

$$v = V_K \left(\frac{I^2}{I_K^2 \left(1 - \frac{1}{\eta} \right)} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

gdzie:

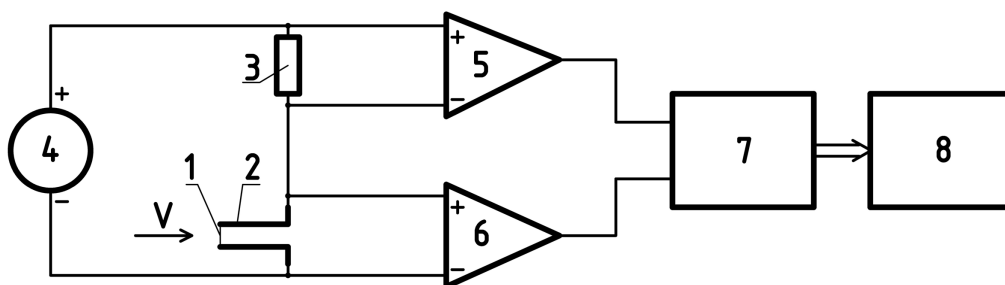
- η – stosunek rezystancji nagrzanego czujnika do rezystancji czujnika w temperaturze medium, nazywany współczynnikiem nagrzania.

Równanie (4) stanowi statyczną zależność prędkości mierzonej od prądu czujnika, pozostałe parametry przyjmuje się jako stałe. Dla układu stałotemperaturowego błąd dynamiczny pomiaru wynika z faktu, że w rzeczywistym układzie rezystancja czujnika nie jest stała, lecz zmienia się w niewielkim zakresie. Optymalizacja układu stałotemperaturowego dla danego czujnika i warunków pomiaru polega na takim dobraniu parametrów układu, aby uzyskać możliwie krótki czas odpowiedzi układu przy zachowaniu stabilności pracy. Pozwala to na osiągnięcie możliwie szerokiego pasma przenoszenia. Pasma to jest jednak limitowane, między innymi ze względu na szумы własne układu oraz problem stabilności pracy. Pasma przenoszenia można rozszerzyć przez zastosowanie czujnika wykonanego z jak najcieńszego drutu, o możliwie małej inercji termicznej. Problem stanowi jednak trwałość mechaniczna takiego czujnika i technologia wykonania.

Proponowany algorytm pomiaru prędkości przepływu oparty na zależności (2), polega na tym, że równocześnie mierzy się chwilowe wartości napięcia i prądu czujnika i przetwarza na sygnał cyfrowy wprowadzany do cyfrowego układu przetwarzania danych, a na ich podstawie dokonuje obliczenia chwilowej wartości rezystancji czujnika jako ilorazu napięcia i prądu oraz obliczenia pochodnej rezystancji czujnika po czasie. Następnie na podstawie chwilowych wartości prądu, rezystancji i pochodnej rezystancji czujnika wyznacza się chwilową wartość prędkości przepływu z zależności (2) wynikającej z dynamicznego modelu czujnika (1), stanowiącego równanie bilansu cieplnego. Przedstawiony sposób pomiaru prędkości nie definiuje układu zasilania czujnika termooanemometrycznego, można wykorzystać układ stałonapięciowy, stałoprądowy oraz stałorezystancyjny, a także inne układy termooanemometryczne. Proponowany algorytm pozwala na poszerzenie pasma przenoszenia pomiaru fluktuacji prędkości czujnikiem termooanemometrycznym, ponieważ metoda wyznaczania prędkości z równania (2) uwzględnia dynamiczne stany nieustalone czujnika. Metoda ta pozwala więc na znaczącą redukcję błędów dynamicznych pomiaru przepływów szybkozmiennych.

4. Pilotażowe zastosowanie metody

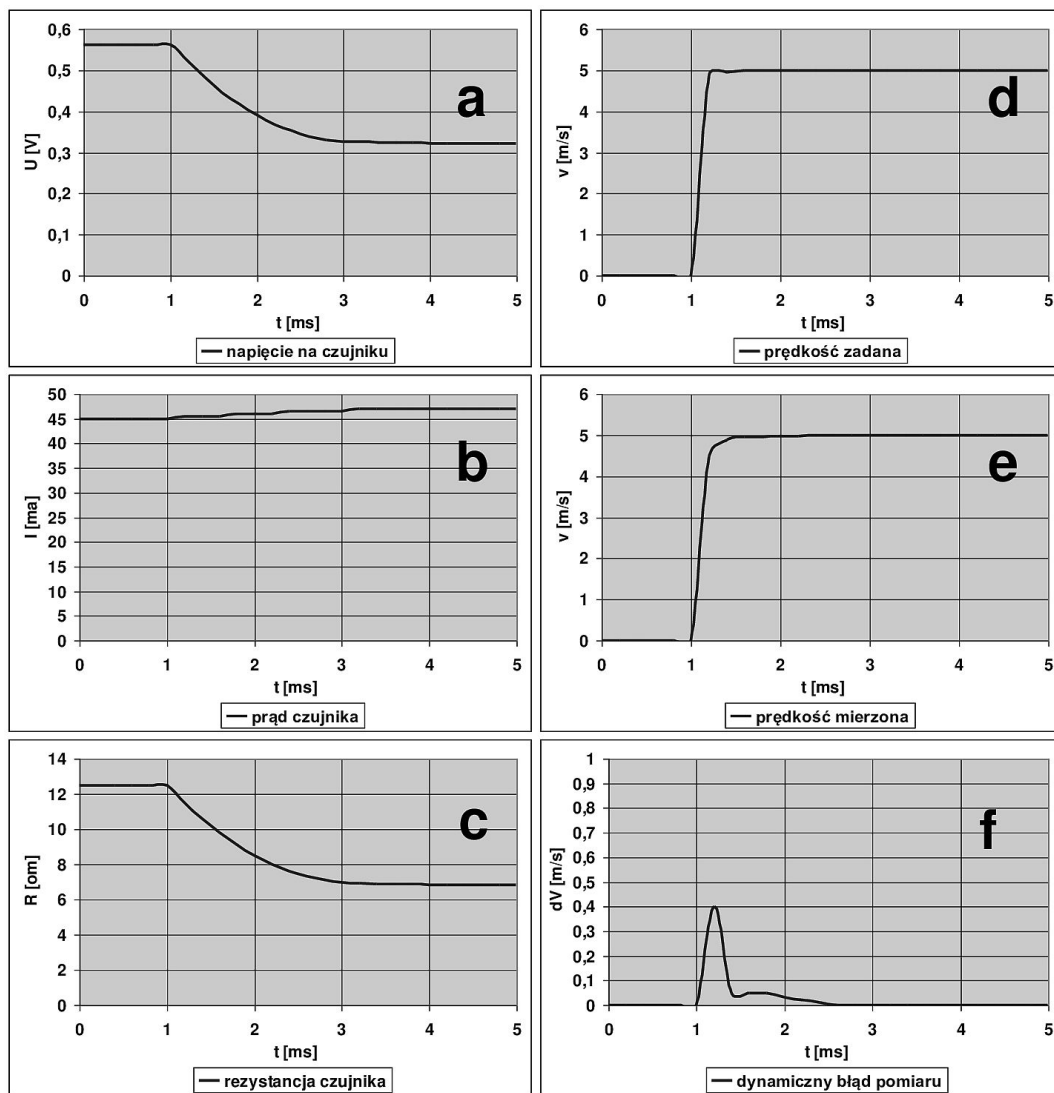
Do badań wstępnych metody wykorzystano układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 1. Wybrano najprostszy układ zasilania czujnika termooanemometrycznego ze źródła napięcia poprzez rezystor umożliwiający pomiar prądu i ograniczający jego wartość. Jest to układ testowy, nie utrzymujący żadnego z parametrów na stałym poziomie, jak to ma miejsce na przykład w klasycznym układzie stałotemperaturowym. Prosty układ zastosowany w badaniach pilotażowych pozwala na testowanie samej metody, ograniczając potencjalny wpływ parametrów rozbudowanego układu elektronicznego.



Rys. 1. Układ pomiarowy do pilotażowych badań algorytmu pomiarowego

W badaniach pilotażowych zastosowano czujnik termooanemometryczny 1 z włóknem wykonanym z drutu platynowego o średnicy 5 mikrometrów i długości 1 mm. Włókno rozpięte jest na stalowych wspornikach igłowych 2 i umieszczone prostopadle do badanego przepływu V . Rezystancja nie nagrzanego czujnika R_0 wynosi około 5,5 oma. Czujnik połączony jest szeregowo z rezystorem stałym 3 o wartości 100 omów i zasilany jest przez ten rezystor ze źródła napięcia 4 o wartości 5 woltów. Napięcie na czujniku oraz napięcie na rezystorze, poprzez wzmacniacze różnicowe 5 i 6 doprowadzane są do dwóch wejść precyzyjnego, szybkiego przetwornika analogowo – cyfrowego 7. Rozdzielczość przetwornika wynosi 16 bitów, a częstotliwość próbkowania 1 MHz. Sygnały cyfrowe z przetwornika, stanowiące miarę chwilowej wartości napięcia i prądu czujnika, są rejestrowane i przetwarzane w systemie komputerowym 8 na chwilową wartość prędkości zgodnie z równaniem (2). W każdym punkcie pomiarowym system komputerowy dokonuje obliczenia

chwilowej wartości rezystancji R czujnika jako ilorazu napięcia i prądu, obliczenia pochodnej rezystancji czujnika po czasie jako ilorazu różnicy rezystancji czujnika z aktualnego i poprzedniego pomiaru do przedziału czasowego między pomiarami. Dla czujnika zastosowanego w badaniach pilotażowych parametry wyznaczano w procesie wzorcowania [22] przed pomiarem i wprowadzono do systemu komputerowego **8**. Wynoszą one odpowiednio: $I_K = 62,9$ mA, $V_K = 2,71$ m/s, $\tau_K = 1,36$ ms. Czujnik umieszczono w przepływie testowym, który stanowi skok prędkości powietrza w tunelu aerodynamicznym od 0 m/s do 5 m/s. Skok został zrealizowany za pomocą wirującej diafragmy, natomiast jego kształt zmierzono za pomocą anemometru o paśmie przenoszenia na poziomie 35 kHz. Na rys. 2. przedstawiono przebiegi sygnałów uzyskane w przykładowym badaniu pilotażowym.



Rys. 2. Przebiegi sygnałów uzyskane w przykładowym teście pilotażowym

Skok prędkości rozpoczyna się w czasie $\tau = 1$ ms, a jego narastanie trwa około 0,2 ms. Na wykresach z lewej strony rysunku 2 przedstawiono kolejno: **a** – przebieg zarejestrowanego napięcia czujnika, **b** – przebieg prądu czujnika, **c** – przebieg wyznaczonej rezystancji czujnika. Na wykresach z prawej strony rysunku 2 przedstawiono: **d** – przebieg prędkości zadanej w tunelu, **e** – przebieg prędkości mierzonej wyznaczonej badaną metodą z zależności (2), oraz **f** – błąd dynamiczny testowego pomiaru.

5. Wnioski

Przedstawione badanie pilotażowe pomiaru przepływu szybkozmiennego pozwala na ustalenie się wyniku pomiaru w czasie około 0,5 ms, podczas gdy napięcie, prąd i rezystancja czujnika ustalają się w cza-

sie znacznie dłuższym, około 3 ms. Uzyskano więc na znaczącą redukcję błędów dynamicznych pomiaru przepływów szybkozmiennych, w stosunku do metod bazujących na statycznym modelu czujnika. Opisany algorytm pomiarowy może zostać zastosowany w wybranej klasie zagadnień metrologicznych związanych z badaniem przepływów turbulentnych i pulsacyjnych. Obszarem zastosowań może być aparatura wykorzystująca czujniki o zwiększonej trwałości, posiadające większą inercję termiczną. Czujniki takie znajdują zastosowanie w pomiarach technicznych i przemysłowych w trudnych warunkach. Metoda umożliwia optymalizację pasma przenoszenia takich czujników.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na projekt badawczy 2017/25/B/ST8/00212: „Nowatorska metoda badania wysoko-amplitudowych, szybkozmiennych przepływów pulsacyjnych – modelowanie, optymalizacja i weryfikacja eksperymentalna”.

Literatura

- [1] Silin N., Cuscuela D., Clausse A., *Experimental assessment on the performance of hot wire anemometry in and around a permeable medium by comparison with Particle Image Velocimetry*. Flow Measurement and Instrumentation 78, 2021, 101827.
- [2] Freymuth P., *Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers*. Rev. of Sci. Instrum. 1967, 38, 677-681.
- [3] Davis M.R., *The dynamic response of constant resistance anemometers*. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1970, 3, 15-20.
- [4] Freymuth P., *Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers*. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1977, 10, 705-710.
- [5] Watmuff J.H., *Investigation of the Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer*. Exp. Thermal and Fluid Sci. 1995, 11, 117-134.
- [6] Saddoughi S.G., Veeravalli S.V., *Hot-wire anemometry behaviour at very high frequencies*. Meas. Sci. Technol. 1996, 7, 1297-1300.
- [7] Freymuth P., *On higher order dynamics of constant-temperature hot-wire anemometers*. Meas. Sci. Technol. 1998, 9, 534-535.
- [8] Payne S.J., *Unsteady Loss in a High Pressure Turbine Stage. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy at the University of Oxford*. Hilary Term, Department of Engineering Science, University of Oxford, 2001 http://www.robots.ox.ac.uk/~sjp/publns/sjp_thesis_c4_chapter4.pdf
- [9] Li D.J., *Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements*. Meas. Sci. Technol. 2004, 15, 1835-1847.
- [10] Li D.J., *The effect of electronic components on the cut-off frequency of the hot-wire system*. Meas. Sci. Technol. 2005, 16, 766-774.
- [11] Li D.J., *Dynamic response of constant temperature hot-wire system under various perturbations*. Meas. Sci. Technol. 2006, 17, 2665-2675.
- [12] Ligęza P., *Constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 78, 2007.
- [13] Ligęza P., *Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant-temperature anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 79, 2008.
- [14] Ligęza P., *An investigation of a constant-bandwidth hot-wire anemometer*. Flow Measurement and Instrumentation, vol. 20, 2009.
- [15] Fan Y., Arwatz G., Buren T.W., Hoffman D.E., Hultmark M., *Nanoscale sensing devices for turbulence measurements*. Experiments in Fluids, 2015, 56, 138.
- [16] Hutchins N., Monty J.P., Hultmark M. et al., *A direct measure of the frequency response of hot-wire anemometers: temporal resolution issues in wall-bounded turbulence*. Experiments in Fluids 2015, 56, 18.
- [17] Fan D., Xiaoqi C., Wong C.W., Li J.-D., *Optimization and Determination of the Frequency Response of Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers*. AIAA Journal 2017, 55 (8).
- [18] Diribarne P., Thibault P., Roche P.-E., *Nano-shaped hot-wire for ultra-high resolution anemometry in cryogenic helium*. Review of Scientific Instruments 90, 2019, 105004.
- [19] Ligęza P., *Modification of Hot-Wire Anemometers Frequency Bandwidth Measurement Method*, Sensors 20 (6), 2020, 1595.
- [20] Bruun H.H., *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*. University Press, Oxford, 1995.

- [21] Ligęza P., *On unique parameters and unified formal form of hot-wire anemometric sensor model*. Review of Scientific Instruments, 2005, 76, 1, 126105.
- [22] Ligęza P., *Static and dynamic parameters of hot-wire sensors in a wide range of filament diameters as a criterion for optimal sensor selection in measurement process*. Measurement 2020, 151, 107177.

Algorithmic optimization of the frequency bandwidth of the hot-wire anemometer

Abstract

One of the challenges of turbulent and pulsed flow metrology is the optimization of the bandwidth of hot-wire anemometers. The miniaturization of sensors is used there, which reduces the thermal inertia of the measuring element, the structure of the electronic system and parameters of its elements are optimized, methods and algorithms for processing the output signal are developed. In typical hot-wire anemometers, the output voltage signal is converted into the measured velocity signal using a static calibration function. The article describes a measurement algorithm that simultaneously uses two measurement signals from an anemometer. These are signals proportional to the sensor voltage and current. Based on these signals and the dynamic calibration function, the measured flow velocity is calculated using a dynamic sensor model.

Keywords: hot-wire anemometer, turbulent flows, pulsed flows, bandwidth optimization, dynamic model