

Koncepcja precyzyjnego pomiaru parametrów przepływów gazów w zakresie małych prędkości z uwzględnieniem zmiany zwrotu i temperatury

KATARZYNA SOCHA, PAWEŁ JAMRÓZ, PAWEŁ LIGĘZA, ELŻBIETA POLESZCZYK

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

Streszczenie

Zmiany wartości temperatur medium wpływają znacząco na statyczne charakterystyki termooanemometrycznych włókien pomiarowych, co powoduje powstawanie błędów w otrzymywanych wynikach pomiarów prędkości przepływu. Wysokie temperatury medium stwarzają konieczność dodatkowego podgrzania czujnika do jeszcze wyższych temperatur, co może prowadzić do jego uszkodzenia na skutek przepalenia włókna. W artykule zaproponowano rozwiązanie problemu pomiaru prędkości przepływu w warunkach wysokich, niestacjonarnych temperatur z wykorzystaniem metody korelacji wzajemnej sygnałów pochodzących z dwuwłokowych czujników termorezystancyjnych pracujących w trybie termometrów stałoprądowych. Zaprezentowano opracowany system pomiarowy oraz przedstawiono wyniki badań z jego użyciem w różnych przypadkach aplikacyjnych.

Słowa kluczowe: korelacyjna metoda pomiaru prędkości przepływu, pomiar temperatury

1. Wstęp

Pomiar małych wartości prędkości przepływów, w zakresie do 1ms^{-1} , jest zagadnieniem wciąż rozwijanym, a opracowane dotychczas metody pomiarowe cechują się dużymi niepewnościami wynikającymi z możliwości i ograniczeń konstruowanych przyrządów pomiarowych.

Termooanemometryczne metody pomiarowe pozwalają na określanie prędkości przepływu wykorzystując zmiany intensywności wymiany ciepła grzanego drucika z otoczeniem wraz ze zmianą prędkości przepływu medium. Przy niskich prędkościach, na skutek zjawisk związanych z występowaniem konwekcji swobodnej z grzanego elementu, funkcja określająca związek prędkości medium i intensywności ciepła staje się nieokreślona. Granica stosowalności metody pomiarowej szacowana jest na $0,2\text{-}0,3\text{ms}^{-1}$ w zależności od rodzaju czujnika i współczynnika nagrzania włókna (Brunn, 1995). Metoda ta jest jednak bardzo wrażliwa na zmiany parametrów związanych z samym medium, a w szczególności z jego temperaturą, ciśnieniem i wilgotnością, wraz ze zmianą których ulega zmianie również charakterystyka statyczna czujnika pomiarowego.

W oparciu o teorię fal cieplnych w Pracowni Metrologii Przepływów została opracowana metoda bezwzględnego pomiaru prędkości przepływu gazu, która znajduje zastosowanie w pomiarach prędkości w zakresie od $0,1$ do 3ms^{-1} (Kielbasa i in., 2004). Metoda wykorzystuje trzy równoległe ustawione względem siebie druciki, znajdujące się na jednej płaszczyźnie, z których jeden podgrzewany jest periodycznie poprzez zmiany współczynnika nagrzania i stanowi źródło fali cieplnej. Kolejne dwa włókna ustawione są w śladzie termicznym, a odległość między nimi jest ściśle określona. Włókna te realizują pomiar fali temperaturowej generowanej przez włókno pierwsze. Na podstawie analizy odpowiedzi włókien termometrów możliwym jest wyznaczenie prędkości przepływu w oparciu o przesunięcie fazowe między sygnałami odpowiedzi czujników termometrycznych.

Obie przedstawione metody, pozwalające na pomiar niskich prędkości, mają ograniczenia w postaci braku możliwości pomiarów przepływów w warunkach fluktuacji wysokich temperatur rzędu setek stopni Celcjusza. Pomiar w takich warunkach wymagałby nagrzania włókna pomiarowego lub generującego falę

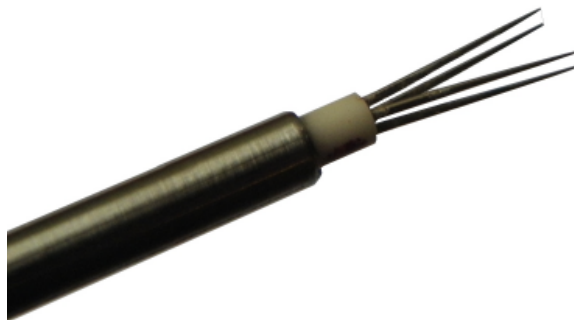
temperaturą znacznie powyżej wartości temperatury medium, co prowadziłoby do jego uszkodzenia. Wykonywanie pomiarów w wysokich temperaturach jest istotne z punktu analizy przepływów występujących między innymi w piecach kalibracyjnych, komorach klimatycznych lub piecach stosowanych do wygrzewania. Z uwagi na zapotrzebowanie analizy takich zjawisk dokonano pierwszych prób opracowania systemu pozwalającego na pomiar niskich wartości prędkości w warunkach przepływów nieizotermicznych.

Opracowany system pomiarowy składa się z dwuwłóknowej sondy termorezystancyjnej, karty pomiarowej NI-USB 6210, czterokanałowego modułu termometru stałoprądowego ATU 08 oraz specjalistycznego oprogramowania do akwizycji i wstępnego przetwarzania danych pomiarowych. Zastosowany w systemie algorytm wyznaczania prędkości przepływu wykorzystuje funkcję korelacji wzajemnej między mierzonymi sygnałami.

2. Korelacyjna metoda pomiaru prędkości przepływu

W systemie wykorzystano dwuwłóknową sondę termorezystancyjną (rysunek 1). W sondzie tej włókna umieszczone zostały na jednym poziomie równolegle względem siebie w odległości około 4 mm. Włókna zostały wykonane z drutu wolframowego o średnicy 3 μm . Ponieważ sonda ta jest dedykowana do pomiarów w wysokich temperaturach (do 350°C), została wyposażona w stalowy pancierz.

Z sondy pomiarowej otrzymywane są dwa sygnały temperaturowe. Ponieważ pojedyncze włókno charakteryzuje się małą pojemnością cieplną, szybko reaguje na fluktuacje temperatury. Jeżeli umieścimy czujnik w przepływie z dominującą jedną składową wektora prędkości, w taki sposób, by płaszczyzna



Rys. 1. Dwuwłóknowa sonda pomiarowa

określona przez oba włókna była równoległa do dominującej składowej wektora prędkości, to oba włókna powinny zarejestrować te same zmiany temperatury, ale w różnych chwilach czasowych.

Narzędziem umożliwiającym wyznaczenie podobieństwa dwóch sygnałów $x(t)$, $y(t)$ jest funkcja korelacji. Korelacja wzajemna (interkorelacja) dwóch sygnałów losowych wyznaczana jest z następującej zależności (Bendat, 1976):

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t-\tau)dt \quad (1)$$

gdzie:

τ – czas opóźnienia między sygnałami.

Dla sygnałów dyskretnych o skończonej liczbie próbek korelację wyznacza się z następującej zależności (Zieliński, 2002):

$$R_{xy}(k) = \sum_{n=0}^{N-1-|k|} x(n)y(n-k) \quad (2)$$

gdzie:

N – długość fragmentu korelowanego sygnału,
 k – przesunięcie między sygnałami.

Interkorelacja jest splotem dwóch sygnałów. Ponieważ splot dwóch sygnałów w dziedzinie czasu jest równoważny iloczynowi ich widm, wartość korelacji można wyznaczyć za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Metoda ta polega na policzeniu transformaty Fouriera dla każdego z korelowanych sygnałów ($X(k)$, $Y(k)$), wymnożeniu ich ze sobą ($X(k)Y^*(k)$), a następnie wyznaczeniu odwrotnej transformaty z otrzymanego wyniku (Zieliński, 2002).

W prezentowanym algorytmie pomiarowym skorzystano z szybkiej metody obliczania korelacji. Przed przystąpieniem do obliczeń, korelowane sygnały, zostały zmodyfikowane poprzez dodanie zer na ich końcach, według następującego schematu:

$$\hat{x}(i) = \begin{cases} 0 & \text{dla } 0 \leq i \leq \frac{M}{2} - 1 \\ \left(x\left(i - \frac{M}{2}\right) - \bar{x}\right) \cdot w\left(i - \frac{M}{2}\right) & \text{dla } \frac{M}{2} \leq i \leq \frac{3M}{2} - 1 \\ 0 & \text{dla } \frac{3M}{2} \leq i \leq 2M - 1 \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

- x – sygnał pomiarowy,
- \bar{x} – wartość średnia sygnału,
- w – okno czasowe,
- M – długość fragmentu sygnału x (okno pomiarowe).

Dodanie zer na początku i końcu sygnału zostało zastosowane ponieważ użyta do wyliczenia widma funkcja FFT realizuje splot kołowy. Dzięki dodanym zerom splot kołowy został zamieniony na splot liniowy, w którym nie następuje zamiana końca sygnału z początkiem.

Dla wybranego fragmentu sygnału obliczono wartość średnią, którą następnie odjęto w celu ograniczenia wartości prążka zerowego w widmie częstotliwościowym sygnału. Dodatkowo, aby ograniczyć gwałtowne nieciągłości na początku i końcu analizowanego fragmentu sygnału, zastosowano ważenie sygnału w postaci parametrycznego okna Tukey'a (rysunek 2). Dzięki temu największy wpływ na wynik podczas korelacji ma środkowy fragment sygnału. Parametryczne okno Tukey'a wyznacza się z następującej zależności:

$$w(i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\pi \left[\frac{2i}{\alpha(M-1)} - 1 \right] \right) \right\} & \text{dla } 0 \leq i \leq \frac{\alpha(M-1)}{2} \\ 1 & \text{dla } \frac{\alpha(M-1)}{2} \leq i \leq \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)(M-1) \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\pi \left[\frac{2i}{\alpha(M-1)} - \frac{2}{\alpha} + 1 \right] \right) \right\} & \text{dla } \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)(M-1) \leq i \leq (M-1) \end{cases} \quad (4)$$

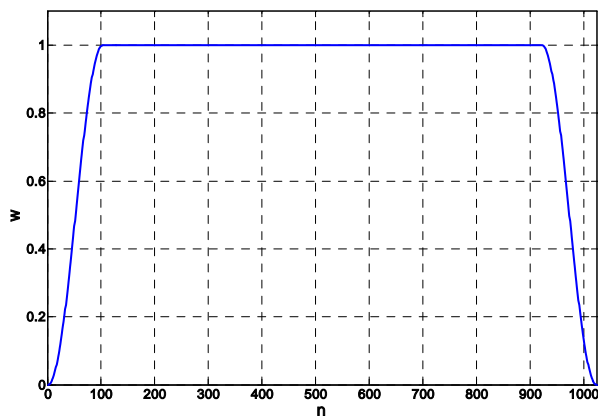
gdzie:

- M – długość okna czasowego,
- α – parametr okna.

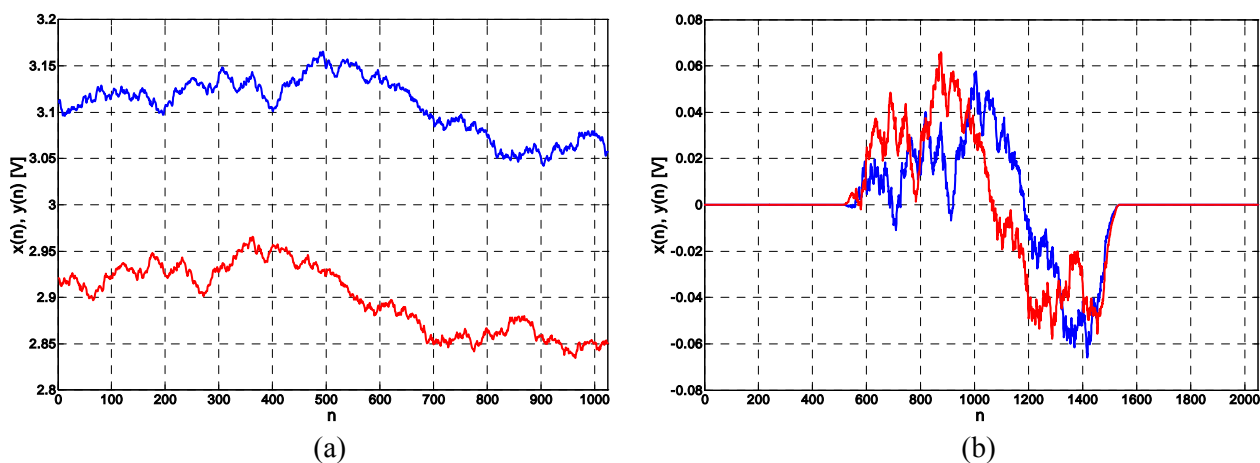
Wykorzystywany do obliczenia wartości okna Tukey'a parametr α określa proporcje ile sygnału zostanie zmienione, a ile pozostanie bez zmiany. W przedstawianym algorytmie założono 20% okres przejściowy. Zastosowanie parametrycznego okna do wycięcia skończonego fragmentu sygnału wpływa pozytywnie na widmo sygnału. Widmo sygnału z oknem czasowym Tukeya uwypatnia więcej szczegółów niż okno prostokątne.

W celu zobrazowania działania algorytmu wyznaczania prędkości wygenerowano sygnał losowy, który został następnie przesunięty o 131 próbek. Na rysunku 3a przedstawiono fragment sygnałów wyciętych oknem prostokątnym o długości 1024 próbek. Natomiast rysunek 3b przedstawia te same fragmenty sygnałów, po zastosowaniu modyfikacji opisanej równaniem (3): po odjęciu wartości średniej, wymnożeniu

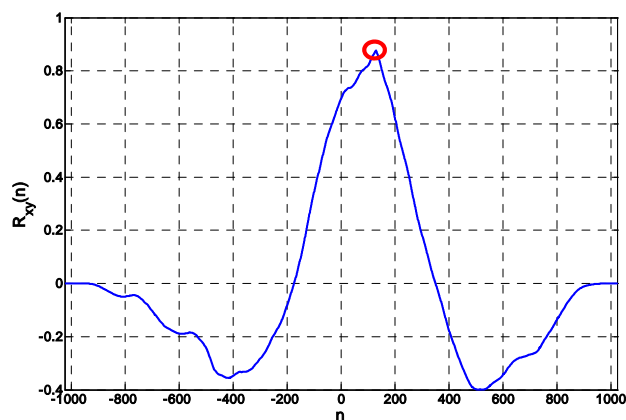
z funkcją ważącą (okno Tukey'a) oraz dodaniu wektora zerowego. Tak wydzielone fragmenty sygnałów są następnie korelowane ze sobą. W wyniku otrzymuje się macierz korelacji, w której poszukuje się wartości maksymalnej (rysunek 4).



Rys. 2. Parametryczne okno Tukey'a, dla $\alpha = 20\%$ i $N = 1024$



Rys. 3. Przykładowe sygnały przed (a) i po (b) zastosowaniu równania (3)



Rys. 4. Wynik korelacji

Na podstawie wyznaczonego położenia maksimum korelacyjnego można określić opóźnienie czasowe τ między sygnałami:

$$\tau = \frac{x_{\max}}{f} \quad (5)$$

gdzie:

- f – częstotliwość próbkowania,
- x_{\max} – wartość przesunięcia wyznaczona z korelacji.

Z kolei znając opóźnienie czasowe oraz odległość między włóknami można wyznaczyć prędkość przepływu badanego medium:

$$v = \frac{d}{\tau} \quad (6)$$

gdzie:

- v – mierzona prędkość,
- d – odległość między włóknami.

Zastosowana metoda obliczeniowa umożliwia poprawny pomiar prędkości jedynie dla przepływu równoległego do płaszczyzny tworzonej przez włókna.

Na wyniki działania zaprezentowanego algorytmu pomiarowego wpływ mają następujące parametry: prędkość medium, częstotliwość próbkowania, długość okna oraz odległość między włóknami sondy. Przyjmując, że odległość między włóknami wynosi 4 mm oraz maksymalna mierzona prędkość nie będzie większa od 1 ms^{-1} można oszacować opóźnienie między sygnałami:

$$\tau = \frac{d}{v_{\max}} = 0,004 \text{ s} \quad (7)$$

Dla częstotliwości próbkowania $f = 10 \text{ kHz}$ daje to przesunięcie równe 40 próbek. Niepewność wyznaczenia prędkości jest odwrotnie proporcjonalna do niepewności oszacowania przesunięcia między sygnałami. Jest to szczególnie widoczne dla dużych prędkości, przy których przesunięcie czasowe jest małe. Przykładowo dla 1 ms^{-1} i 10 kHz niepewność oszacowania jednego prążka ± 1 spowoduje wyznaczenie prędkości $1,026$ lub $0,976 \text{ ms}^{-1}$ (około 2,5%).

Dla prędkości v_{\min} stukrotnie mniejszej przesunięcie wyniesie aż 4000 próbek. Wynika z tego, że długość okna powinna być większa niż 4000. Ponieważ FFT wymaga sygnału o długości 2^n to okno pomiarowe może mieć długość albo 4096 albo 8192. Po uzupełnieniu zerami (równanie (3)) daje to dwa razy więcej korelowanych próbek. Analiza tak długich sygnałów jest bardzo kosztowna obliczeniowo. Dodatkowo ich analiza może być zbyt długa i uniemożliwić wykonanie pomiarów w czasie rzeczywistym.

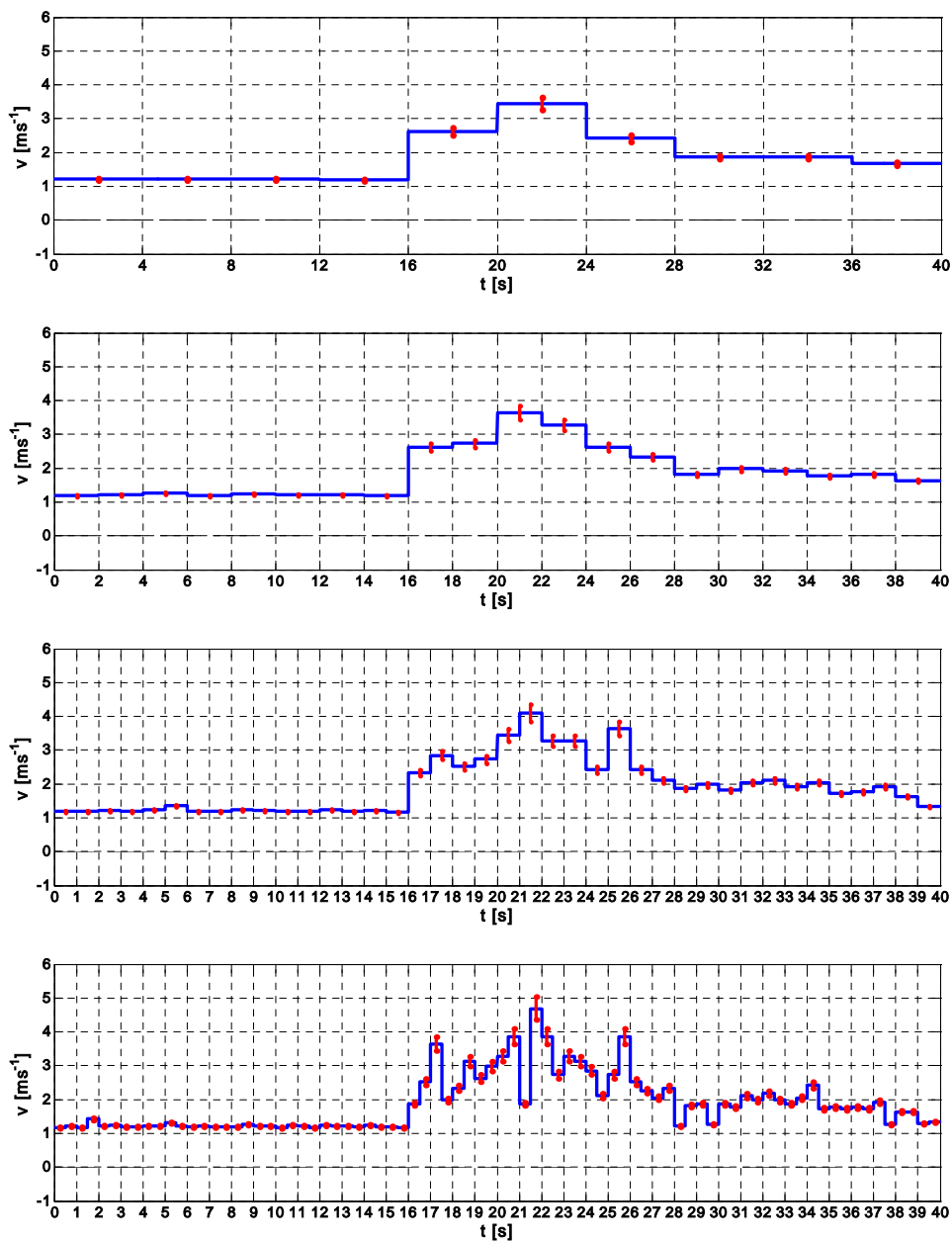
3. Testowanie metody pomiaru prędkości

Prezentowana metoda pomiarowa została przetestowana na stanowisku laboratoryjnym umożliwiającym zadawanie przepływu o zmiennej temperaturze i prędkości (rysunek 5a). Sondę umieszczono w ten sposób, że zarówno włókna, jak i obsadka znajdowały się prostopadle względem przepływu (rysunek 5b). Podczas eksperymentu wygenerowano przepływ z wykorzystaniem wentylatora bocznokanałowego sterowanego za pomocą falownika. Zmienny sygnał temperaturowy uzyskano z wykorzystaniem konwekcji swobodnej, której źródło stanowiły grzałki opaskowe umieszczone wzdłuż rury, stanowiącej komorę podgrzewania. Uzyskano w ten sposób przepływ z dominującą pionową składową prędkości. Pomiar przeprowadzono dla trzech zadawanych prędkości: około 1, 4 oraz 2 ms^{-1} . Częstotliwość próbkowania wynosiła 16384 Hz .

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki eksperymentu otrzymane dla różnych długości okien pomiarowych. Na wszystkich wykresach można zaobserwować moment zmiany prędkości: w 16 sekundzie wzrost prędkości i około 28 sekundy jej spadek. Zmiana długości okna pomiarowego wpływa na rozdzielczość czasową, dzięki temu przy mniejszych oknach można rozróżnić fluktuacje prędkości. Krótkie maski wydobywają szczegóły w sygnale. Z drugiej jednak strony nie mogą być za małe, żeby algorytm był w stanie wykryć niewielkie prędkości przepływu.



Rys. 5. a) Stanowisko pomiarowe umożliwiające zadawanie przepływu o zmiennej temperaturze i prędkości;
b) sposób umieszczenia sondy podczas pomiarów

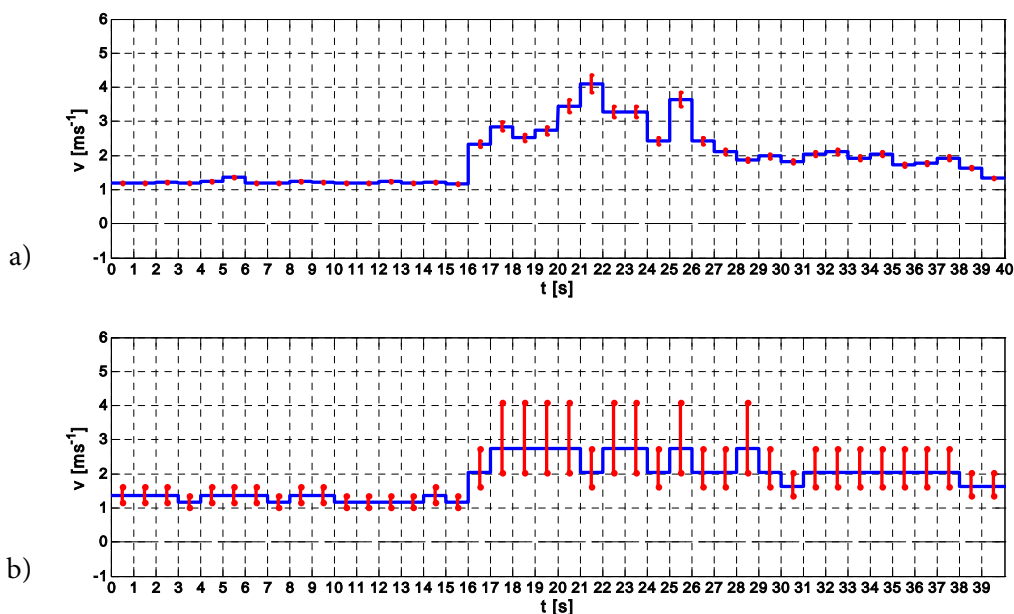


Rys. 6. Wyniki pierwszego eksperymentu otrzymane dla różnych okien pomiarowych

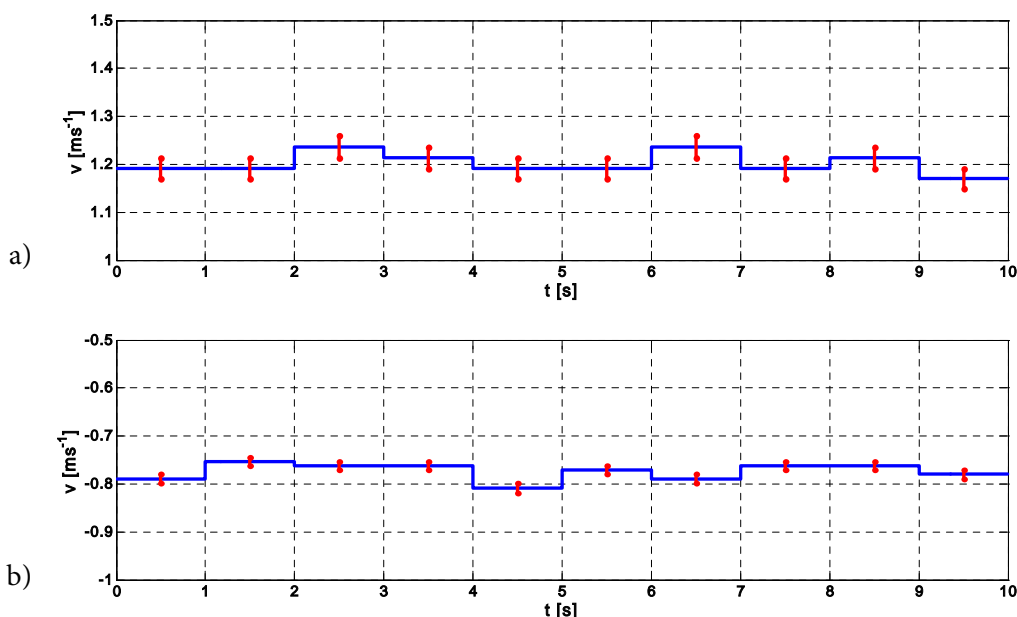
Na wykresach dodatkowo zaznaczono liniami pionowymi niepewność metody, czyli wartość prędkości wyznaczoną dla przesunięcia maksimum korelacyjnego ± 1 próbkę. Widać, że błąd ten rośnie dla wyższych prędkości. Dla większych prędkości przesunięcie jest mniejsze, dlatego przesunięcie o jedną próbkę położenia maksimum ma większe znaczenie na otrzymywane wyniki.

Na rysunku 7 przedstawiono te same fragmenty sygnałów dla różnych częstotliwości próbkowania. Na górnym wykresie umieszczono sygnały zarejestrowane z częstotliwością 16384 Hz. Natomiast na drugim wykresie ten sam sygnał zdecydowany ośmiokrotnie. W ten sposób zasymulowano częstotliwość próbkowania równą 2048 Hz. Można zauważyć, że w przypadku niskiej częstotliwości uzyskana rozdzielczość amplitudowa jest zdecydowanie mniejsza oraz że niepewności pomiarów są bardzo duże. W praktyce uniemożliwiają one prawidłowe określenie zmian prędkości występujących w sygnale.

W kolejnym eksperymencie obrócono sondę o 180° względem jej osi. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wyników dla dwóch ustawień sondy. Napływ na drugie włókno pomiarowe spowodował,



Rys. 7. Wyniki eksperymentu dla różnej częstotliwości próbkowania: a) 16384 Hz oraz b) 2048 Hz



Rys. 8. Wyniki badania wrażliwości metody na zmianę zwrotu: a) napływ na pierwsze włókno pomiarowe (zwrot dodatni), b) napływ na drugie włókno pomiarowe (zwrot ujemny)

Ponieważ duża częstotliwość próbkowanie sygnału wiąże się z wysokimi kosztami obliczeniowymi, w prezentowanej metodzie pomiarowej można by było zaimplementować algorytm adaptacyjnie dobierający liczbę próbek w oknie do aktualnej prędkości.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

5. Literatura

- Bendat J.S., Persol A.G., 1976: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*. PWN Warszawa.
- Brunn H., 1995: *Hot-wire anemometry. Principles and signal analysis*. University Press, Oxford.
- Zieliński T. P., 2002: *Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Kiełbasa J., Ligeża P., Poleszczyk E., Rachalski A., 2004: *Eksperymentalna weryfikacja wielokanałowego termooanemometrycznego systemu pomiarowego jako anemometru z falą cieplną*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 6, nr 3-4, s. 205-215.

The concept of a precise measurement of the gas flow parameters for small velocities, with focus on direction and temperature changes

Abstract

Changes in the values of the temperatures of a medium have a significant bearing on the static properties of thermoanemometric measuring fibers. As a consequence, the results of the flow velocity measurements are encumbered with errors. High temperatures of the medium require additional heating of the sensor to make it even hotter. However, this might damage the sensor due to a possible fiber burning. In the article, it has been suggested that the problem with measuring the flow velocity under high, unsteady temperatures, should be solved by means of a method involving mutual correlation of the signals coming from two-fiber termoresistential sensors working in the manner of constant current thermometers (CCT). Also, the article presents a complete measuring system, as well as the results of tests carried out with it, in various application cases.

Keywords: correlation method for measuring flow velocity, temperature measurement