

Metody analizy sygnału anemometru z drgającym grzanym włóknem

KONRAD PAPIERZ, JAN KIELBASA

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

Streszczenie

Artykuł zawiera omówienie metod pomiaru prędkości przepływu gazu anemometrem z drgającym grzanym włóknem (oscylacyjnym) oraz rezultaty przeprowadzonych symulacji. Czujnik termoanemometru umieszczony prostopadle do przepływu poddawany jest sinusoidalnym drganiom. Pierwsza z przedstawionych metod polega na wyznaczeniu amplitudy drgań, przy której następuje zrównanie prędkości przepływu z prędkością oscylacji. Odbywa się to poprzez analizę przebiegu drugiej pochodnej napięcia termoanemometru. Druga z przedstawionych metod opiera się na analizie częstotliwościowej napięcia. Umożliwia pomiar bardzo małych prędkości. Obie metody są metodami absolutnymi – wynik pomiaru jest niezależny od współczynników charakteryzujących czujnik termoanemometryczny.

Słowa kluczowe: anemometr z drgającym grzanym włóknem, pomiar absolutny, pomiar małych przepływów

1. Wstęp

Metoda pomiaru prędkości przepływu gazu z zastosowaniem termoanemometru, w którym czujnik umieszczony prostopadle do przepływu poddawany jest sinusoidalnym drganiom została zaproponowana w 1969 roku przez duńską firmę DISA. Wprowadziła ona wtedy na rynek nowy przyrząd do pomiaru wolnych przepływów – *Low velocity anemometer* [10].

W pracach [3, 4 i 6] koncepcja termoanemometru z drgającym włóknem (oscylacyjnego) została rozwinięta. Autorzy nie przeprowadzili jednakże analizy pełnych możliwości jakie daje anemometr oscylacyjny. Umożliwia on tymczasem dokonanie pomiaru prędkości przepływu gazu niezależnego od współczynników opisujących charakterystykę prędkościowo-napięciową czujnika. Jest to więc pomiar absolutny. Stanowi to wielką zaletę, ponieważ pozwala na pomiar prędkości bez wcześniejszej kalibracji czujnika, a także czyni go niewrażliwym na zmiany w czasie wspomnianych parametrów. Nowa, bezwzględna metoda pomiaru została opisana w [1] i [2]. W niniejszej pracy autorzy proponują sposób jej implementacji, a także rozwinięcie, zwiększające możliwości tej metody pomiaru.

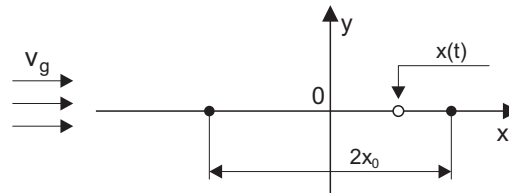
2. Teoria pomiaru

Dla małych (poniżej 0.5 m/s) prędkości przepływu gazu napięcie termoanemometru stałotemperaturowego może zostać opisane parabolą [1]:

$$u(t) = A + Bv^2(t) \quad (1)$$

gdzie A i B są stałymi charakteryzującymi parametry czujnika i medium, uzyskiwanymi podczas jego kalibracji.

Czujnik umieszczony prostopadle do wektora prędkości przepływu poddawany jest sinusoidalnym drganiom o amplitudzie x_0 i częstotliwości f w płaszczyźnie równoległej do wektora prędkości (Rys. 1.).



Rys. 1. Drgania włókna czujnika [1]

Zakłada się, że drgania są na tyle niewielkie, że przepływ pozostaje niezakłócony. Prędkość sondy względem układu współrzędnych będzie zatem dana wzorem:

$$v(t) = 2\pi x_0 f \cos(2\pi ft) = v_0 \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

gdzie $v_0 = 2\pi x_0 f$ jest amplitudą prędkości.

Napięcie na grzanym włóknie, w sytuacji gdy czujnik jest przemieszczany, będzie zależało od różnicy między prędkością gazu v_g (którą przyjęto za stałą), a prędkością czujnika. Różnica ta, określana dalej jako prędkość efektywna, będzie miała postać:

$$v_{ef}(t) = v_g - v(t) = v_g - v_0 \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

Podstawiając (3) do (1) otrzyma się wzór opisujący napięcie termooanemometru oscylacyjnego:

$$u(v_{ef}(t)) = A + Bv_{ef}^2(t) = A + B[v_g - v_0 \cos(2\pi ft)]^2 \quad (4)$$

Gdy prędkość gazu i chwilowy kierunek przemieszczania się czujnika będą posiadały zgodne zwroty prędkość efektywna, a więc i wartość napięcia, będzie najmniejsza. Natomiast gdy zwroty będą przeciwnie prędkość efektywna i napięcie będą największe.

3. Pomiar prędkości na podstawie analizy czasowej

3.1. Opis metody

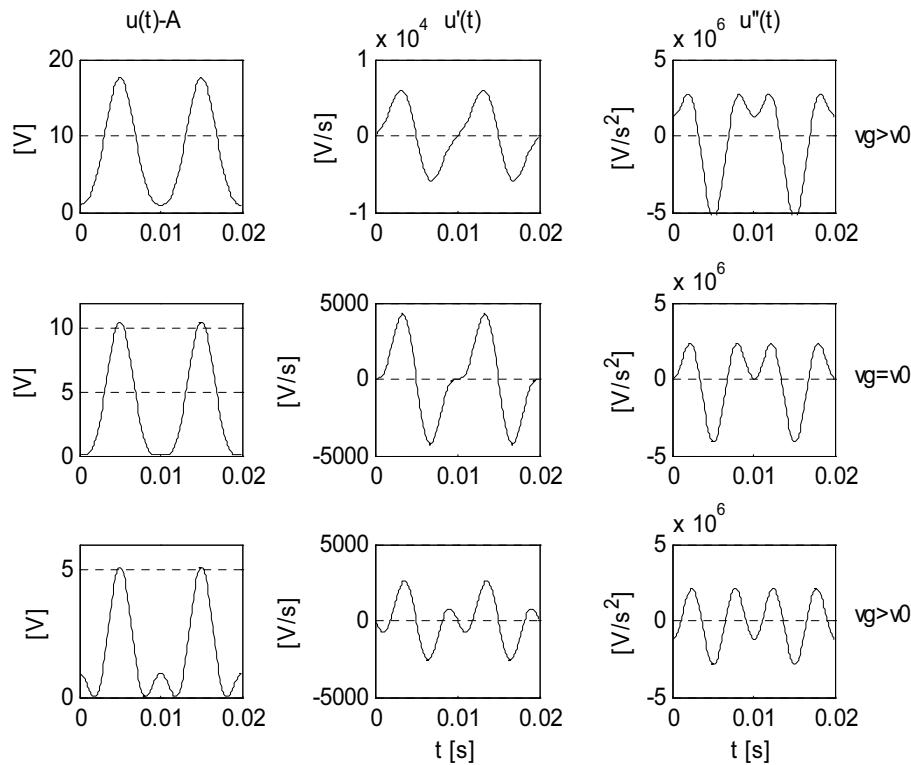
W sygnale napięcia (4) istotna jest część zależna od prędkości gazu i parametrów oscylacji. W poniższej analizie przyjęte jest więc, że od napięcia anemometru odjęta jest wartość składowej stałej A . Charakter przebiegów czasowych sygnału napięcia będzie zależny wtedy tylko i wyłącznie od wspomnianej prędkości efektywnej. Może ona być cały czas dodatnia – gdy $v_g > v_0$, przyjmować przez część okresu wartość ujemną – gdy $v_g < v_0$, bądź też posiadać w okresie dokładnie jedno miejsce zerowe – gdy $v_g = v_0$. Doprowadzenie podczas pomiaru do ostatniego z przedstawionych przypadków umożliwia łatwe wyznaczenie prędkości gazu – należy w tym celu zmierzyć jedynie amplitudę drgań sondy x_0 oraz ich częstotliwość f :

$$v_g = v_0 = 2\pi f x_0 \quad (5)$$

Powyższe równanie nie zależy od współczynników A , B opisujących charakterystykę sondy, a więc metodę tę można uznać za absolutną. Cała trudność polega jedynie na dokładnym określeniu momentu zrównania prędkości przepływu z maksymalną prędkością oscylacji $v_g = v_0$, regulując amplitudą lub/i częstotliwością drgań.

Rys. 2 przedstawia przebiegi czasowe napięcia (z odjętą stałą A) oraz jego pierwszej i drugiej pochodnej dla wszystkich trzech omawianych przypadków. Poszukiwany moment zrównania prędkości gazu z amplitudą prędkości drgań przejawia się w poszczególnych przebiegach w następujący sposób:

- sygnał napięcia (z odjętą składową stałą A) posiada jedno miejsce zerowe w okresie (gdy $v_g < v_0$ posiada dwa, a gdy $v_g > v_0$ nie posiada wcale miejsc zerowych)
- pierwsza pochodna napięcia posiada dwa miejsca zerowe w okresie, w tym jedno podwójne (gdy $v_g < v_0$ posiada cztery, a gdy $v_g > v_0$ dwa pojedyncze miejsca zerowe)
- druga pochodna posiada trzy miejsca zerowe w okresie (gdy $v_g < v_0$ posiada cztery, a gdy $v_g > v_0$ dwa miejsca zerowe)



Rys. 2. Przebiegi czasowe sygnału napięcia i jego pochodnych

Określona zmiana amplitudy drgań największą zmianę kształtu przebiegu wywołuje dla drugiej pochodnej. Zatem najłatwiejszą drogą do wyznaczenia poszukiwanego momentu zrównania prędkości wydaje się być obserwacja drugiej pochodnej i doprowadzenie do sytuacji gdy ma ona trzy miejsca zerowe w okresie. Zastosowanie tej metody dla rzeczywistych pomiarów może być jednak utrudnione. W rzeczywistym sygnale zawsze obecne są zakłócenia. Będą miały one istotny wpływ na dokładność algorytmu pomiarowego opierającego się na analizie przebiegu czasowego drugiej pochodnej. Obliczanie pochodnej jest bardzo wrażliwe na nawet niewielkie szумы obecne w sygnale pomiarowym. Ich wpływ można jednak ograniczyć stosując np. filtrację dolnoprzepustową, bądź algorytmy obliczania pochodnej z jednoczesnym wygładzaniem.

Niewątpliwie mniej wrażliwa na zakłócenia byłaby analiza samego sygnału napięciowego. Jednakże wtedy do określenia poszukiwanego momentu niezbędna jest znajomość stałej kalibracyjnej A . Tak więc pomiar przestałby być absolutny.

3.2. Implementacja – wyniki symulacji

Przedstawiony powyżej algorytm pomiaru prędkości przepływu polega na doprowadzeniu do sytuacji gdy $v_g = v_0$. Przyjęte będzie, że zadana częstotliwość jest stała, natomiast regulacja prędkości oscylacji odbywa się tylko poprzez zmianę amplitudy drgań.

Do wyznaczania drugiej pochodnej zastosowano klasyczny algorytm Savitzky'ego – Golay'a [8]. Służy on do wygładzania zaszumionych sygnałów, a także umożliwia obliczenie pochodnych sygnału z jednoczesnym ich wygładzaniem. Polega na lokalnej regresji wielomianowej z wykorzystaniem okna o zadanej długości. W przeciwieństwie do średniej ruchomej zachowuje lokalne maksima i minima, co będzie szczególnie cenne w analizowanym zadaniu.

W otrzymanym sygnale drugiej pochodnej istotna jest jej wartość w punkcie, gdzie potencjalnie może wystąpić trzecie miejsce zerowe. Algorytm pomiarowy będzie polegał na zmienianiu amplitudy drgań i pomiarze drugiej pochodnej we wspomnianym punkcie – celem jest uzyskanie jej zerowej wartości.

Liniowa zmiana amplitudy z określonym krokiem byłaby mało efektywną metodą. Doprowadzenie do wyrównania prędkości mogłoby w niektórych przypadkach wymagać wielokrotnej zmiany amplitudy – pomiar zajmowałby więc długi okres czasu. Ponadto wrażliwość tej metody na zakłócenia byłaby znaczna. Zastosowane zostało zatem inne podejście.

Drugą pochodną napięcia anemometru oscylacyjnego można obliczyć z równania (4). Wynosi ona:

$$\frac{d^2 u(v_{ef}(t))}{dt^2} = 8B\pi^2 f^2 v_0 [v_g \cos(2\pi ft) - v_0 \cos(2 \cdot 2\pi ft)] \quad (6)$$

gdzie $v_0 = 2\pi x f$. Jej wartość w punkcie możliwego wystąpienia trzeciego miejsca zerowego ($t = \frac{k}{f}$, $k \in \mathbf{Z}$) dana jest wzorem:

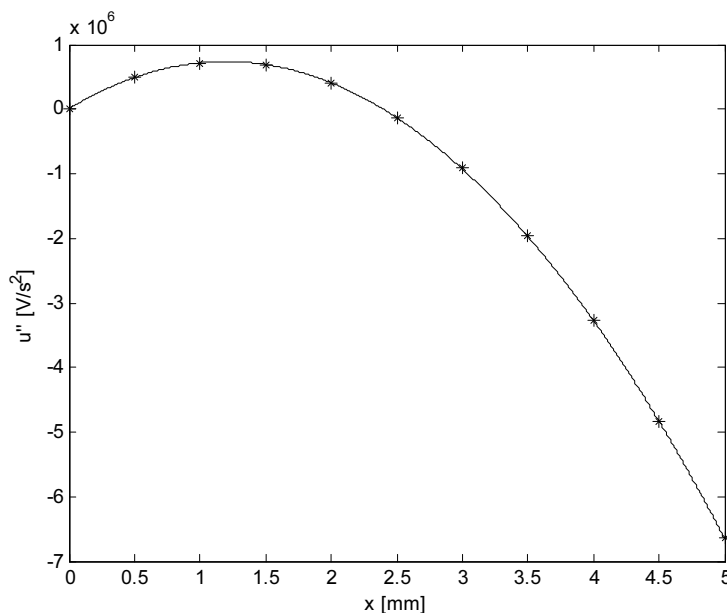
$$\frac{d^2 u\left(v_{ef}\left(\frac{k}{f}\right)\right)}{dt^2} = -32B\pi^4 f^4 \cdot x^2 + 16B\pi^3 f^3 \cdot v_g \cdot x \quad (7)$$

Jak wynika z powyższego równania zmieniając amplitudę drgań i mierząc sygnał drugiej pochodnej w opisanym wcześniej punkcie otrzymuje się parabolę.

Zmiana amplitudy przebiega zatem w proponowanej metodzie w następujący sposób. Cały obszar możliwej zmiany amplitudy drgań (od 0 do $x_{0\max}$) podzielony jest na 10 równych części wyznaczających krok zmiany amplitudy drgań. Dla każdej z tych amplitud mierzona wartość drugiej pochodnej w punkcie, gdzie oczekuje się wystąpienia trzeciego miejsca zerowego. Uzyskane w ten sposób wyniki zostaną poddane regresji wielomianem drugiego stopnia. Jedno z jego miejsc zerowych przypada dla amplitudy drgań równej 0, natomiast drugie jest poszukiwaną wartością amplitudy drgań, przy której następuje zrównanie $v_g = v_0$. Znalezione miejsce zerowe można podstawić do zależności (5) otrzymując poszukiwaną prędkość przepływu gazu.

Rys. 3 zawiera wartości drugiej pochodnej otrzymane w przeprowadzonej symulacji, wraz z przebiegiem przybliżającej je paraboli, uzyskane dla przykładowych danych:

$$v_g = 1 \text{ m/s}, x_{0\max} = 5 \text{ mm}, f = 100 \text{ Hz}, A = 1.697, B = 1.656, 10000 \text{ próbek na sekundę}$$



Rys. 3. Wartość drugiej pochodnej, przy zmianie amplitudy drgań

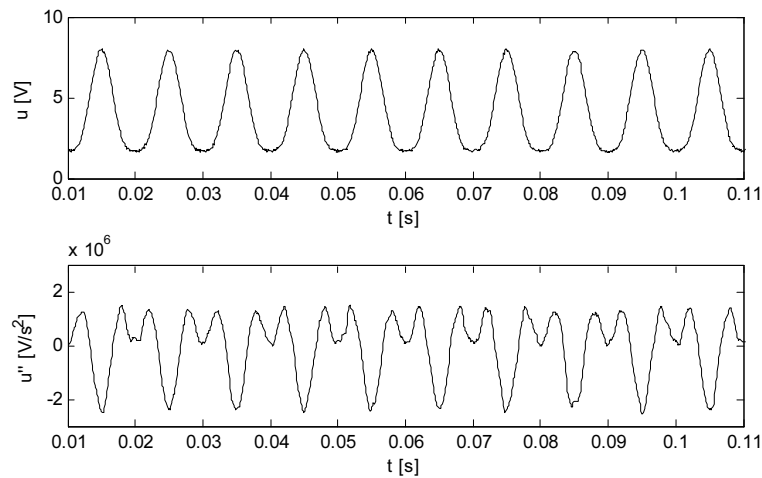
Tabela 1 zawiera średnie oraz maksymalne wartości błędów, dla każdej prędkości wyznaczone z 1000 pomiarów. Do sygnału napięcia dodany został szum wynoszący 5% składowej stałej A . Długość okna filtru Savitzky'ego – Golay'a wynosiła 51, rząd wielomianu aproksymującego 8. Każda z otrzymanych wartości drugiej pochodnej była średnią z 20 pomiarów. Prędkość była zadawana w granicach od 0,25 do 3 m/s. Pozostałe parametry były identyczne jak we wcześniejszej symulacji. Jak widać mimo obecności zakłóceń metoda pomiaru działa poprawnie.

Tab. 1. Błąd pomiaru prędkości – metoda analizy czasowej – wyniki symulacyjne

Zadana prędkość [m/s]	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Błąd średni [%]	9,05	2,07	0,77	0,64	0,63	0,63	0,63
Błąd maksymalny [%]	39,38	8,47	2,89	1,86	1,18	0,95	1,02

Możliwy jest jeszcze inny sposób obliczenia prędkości gazu. Pomiar przebiega w identyczny sposób jak opisano powyżej, jednak prędkość gazu nie jest obliczana z zależności (5) lecz bezpośrednio z otrzymanych na drodze regresji wielomianowej współczynników paraboli (7). Przyjmując $a = -32B\pi^4 f^4$, $b = 16B\pi^3 f^3 \times v_g$, po dokonaniu kilku przekształceń otrzyma się zależność na prędkość przepływu gazu:

$$v_g = \frac{-2\pi f b}{a} \quad (8)$$

Rys. 4. Sygnał napięcia i jego druga pochodna, $v_g = 1$ m/s, $x = 1,5$ mm, szum $5\% \times A$

3.3. Zakres stosowania

Przedstawiona metoda opiera się na zależności (1) opisującej napięcie w funkcji prędkości. Przybliżenie takie można zastosować jedynie dla małych prędkości [1], dla większych obowiązuje znany wzór Kinga [7]. Metoda nadaje się jednakże do pomiaru zarówno małych, jak i większych prędkości – nie mieszczących się w podanym ograniczeniu. Wynika to z faktu iż jeżeli doprowadzimy do zrównania prędkości gazu z maksymalną prędkością oscylacji $v_g = v_0$ to w momencie pomiaru sygnału prędkość efektywna gazu względem włókna jest zawsze bardzo bliska zeru. Tak więc zastosowanie przybliżenia (1) jest jak najbardziej uprawnione.

4. Pomiar prędkości na podstawie analizy częstotliwościowej

4.1. Opis metody

Inną metodą pomiaru prędkości gazu przy użyciu termoanemometru z drgającym włóknem jest zastosowanie analizy częstotliwościowej otrzymywanego sygnału napięciowego. Przekształcając równanie (4) otrzymuje się:

$$u(v_{ef}(t)) = A + Bv_g^2 + \frac{Bv_0^2}{2} - 2Bv_g v_0 \cos(2\pi ft) + \frac{Bv_0^2}{2} \cos(2 \cdot 2\pi ft) \quad (9)$$

Z powyższego równania wynika, że w sygnale występuje składowa stała oraz pierwsza i druga harmoniczna, przeciwne w fazie, o amplitudach odpowiednio:

$$h_1 = 2Bv_g v_0 \quad (10)$$

$$h_2 = \frac{Bv_0^2}{2} \quad (11)$$

Z równania (11) należy wyliczyć parametr B i podstawić do równania (10). Możliwe jest wtedy wyznaczenie prędkości przepływu gazu:

$$v_g = \frac{v_0 h_1}{4h_2} = \frac{\pi f x_0 h_1}{2h_2} \quad (12)$$

4.2. Implementacja – wyniki symulacji

Podobnie jak dla metody bazującej na analizie czasowej konieczny jest pomiar amplitudy i częstotliwości drgań sondy, a ponadto wartości pierwszej i drugiej harmonicznej. Podejście to cechuje jednak zdecydowanie mniejsza wrażliwość na zakłócenia pojawiające się w sygnale. W poprzedniej metodzie szumy mogły utrudnić wyznaczenie chwili, gdy druga pochodna posiada trzy miejsca zerowe. Natomiast w metodzie częstotliwościowej mierzone są amplitudy harmonicznych, a więc wpływ zakłóceń na pomiar będzie mniejszy.

Do obliczenia prędkości gazu ze wzoru, wystarczająca jest znajomość nawet nie bezwzględnych wartości amplitud harmonicznych, lecz ich stosunku. Dzięki temu wpływ przecieku widma – nieuchronnie pojawiający się przy analizie fourierowskiej rzeczywistych sygnałów – nie będzie miał tak istotnego wpływu na wynik pomiaru.

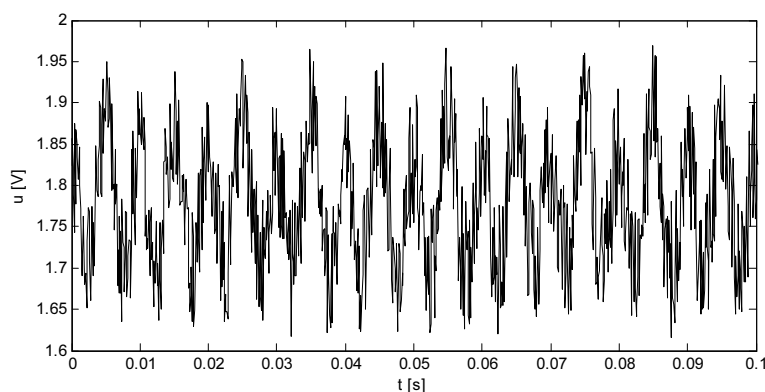
Ponadto nie ma konieczności wykrycia momentu gdy $v_g = v_0$. Pomiar może być dokonany w dowolnym momencie. Oczywiście im większe będzie wartość obu harmonicznych w stosunku do szumu, tym mniejszym błędem będzie obarczony pomiar. (Należy jednak uwzględnić ograniczenie zakresu opisane w punkcie 4.3).

W proponowanej metodzie do pomiaru prędkości przepływu nie jest potrzebna znajomość całego widma napięcia, a jedynie dwóch harmonicznych. Umożliwia to zastosowanie zamiast FFT algorytmu Goertzel'a [9], który pozwala na wyznaczenie pojedynczego prążka widma. Potrzebny nakład obliczeniowy będzie wtedy znacznie mniejszy, co pozwala na łatwe zaimplementowanie metody w systemie wbudowanym, opartym na mikrokontrolerze.

Tabela 2 zawiera średnie oraz maksymalne wartości błędów, dla każdej prędkości wyznaczone z 1000 pomiarów. Amplituda oscylacji wynosiła $x_0 = 0,5$ mm, prędkość przepływu była zadawana w granicach od 0,01 do 0,2 m/s. Pozostałe parametry, w tym poziom dodanego szumu, były identyczne jak w symulacji opisanej w punkcie 3.2. Jak widać mimo znacznego udziału zakłóceń przy tak małych prędkościach przepływu i niewielkiej prędkości oscylacji (Rys. 5), błąd pomiaru jest akceptowalny. Metoda ta pozwala więc na pomiar bardzo małych prędkości. Zmniejszenie błędów możliwe przez zastosowanie metody uśredniania widm. Oczywiście spowoduje to także wydłużenie czasu pomiaru.

Tab. 2. Błąd pomiaru prędkości – metoda analizy częstotliwościowej – wyniki symulacyjne

Zadana prędkość [m/s]	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2
Błąd średni [%]	12,18	4,91	2,79	1,93	1,71	1,44
Błąd maksymalny [%]	50,03	17,12	13,21	7,42	7,17	5,68



Rys. 5. Sygnał napięcia, $v_g = 0,025$ m/s, $x = 0,5$ mm, szum $5\% \times A$

4.3. Zakres stosowania

W przeciwieństwie do wcześniej omawianej metody opierającej się na analizie czasowego przebiegu, która wymagała pomiaru sygnału tylko w jednym charakterystycznym punkcie, metoda pomiaru prędkości wykorzystująca analizę częstotliwościową z oczywistych względów – stosowana jest transformata Fouriera – wymaga ciągłej akwizycji przynajmniej kilku okresów sygnału. Jednocześnie opiera się na zależności (1), uprawnionej jedynie dla niewielkich prędkości [1]. Podczas pomiaru prędkość efektywna cały czas musi więc być mniejsza od podanej granicy. Jest to ograniczenie tej metody. Jednocześnie jej zaletą jest możliwość pomiaru bardzo małych prędkości, brak konieczności regulacji amplitudy drgań oraz znacznie krótszy czas pomiaru w porównaniu do metody z zastosowaniem analizy przebiegu czasowego.

5. Wykrycie zwrotu przepływu

Termoanemometr z drgającym grzanym włóknem pozwala również na bardzo łatwe wyznaczenie zwrotu przepływu [4]. W tym celu potrzebne jest jedynie dokonanie dwóch pomiarów na każdy okres oscylacji gdy włókno znajduje się w położeniu zerowym – pierwszego gdy zmierza dodatnią stronę osi x (patrz Rys. 1) drugiego gdy zmierza w stronę ujemną.

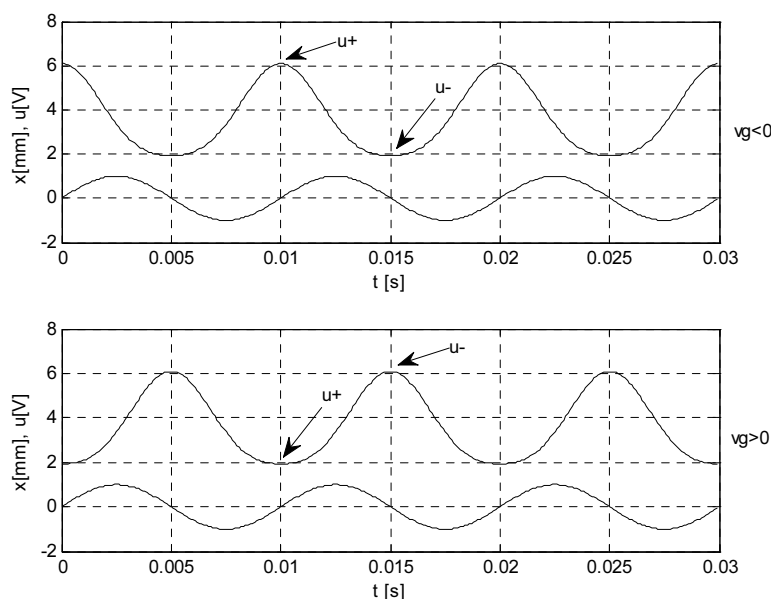
Napięcie termoanemometru jest funkcją prędkości efektywnej opisanej równaniem (3). W momencie gdy włókno znajduje się w położeniu zerowym, jego prędkość jest największa. Tak więc napięcie przyjmie wtedy swoje skrajne wartości – maksymalną, gdy prędkość gazu i zwrot oscylacji będą przeciwne (największa prędkość efektywna) oraz minimalną – gdy zwroty będą zgodne (najmniejsza prędkość efektywna).

Podsumowując można stwierdzić, że pomiar zwrotu przepływu sprowadza się do porównania napięć termoanemometru w położeniach zerowych oscylacji. Jeżeli:

$$u_+ < u_- \Rightarrow v_g > 0 \quad (13)$$

$$u_+ > u_- \Rightarrow v_g < 0 \quad (14)$$

gdzie u_+ i u_- są wartościami napięcia zmierzonymi w zerowym położeniu, w momencie gdy włókno przemieszczany jest w dodatnią oraz ujemną stronę osi x . Ilustrację obu tych przypadków przedstawia Rys. 6.



Rys. 6. Wykrycie zwrotu przepływu gazu

6. Podsumowanie

W artykule zostały przedstawione dwie metody pomiaru prędkości przepływu gazu przy pomocy termoanemometru z drgającym grzanym włóknem (oscylacyjnego):

- na podstawie analizy przebiegu czasowego drugiej pochodnej napięcia termoanemometru,
- na podstawie analizy częstotliwościowej napięcia termoanemometru.

Przeprowadzone zostały badania symulacyjne, w których wykazano poprawność przyjętych rozwiązań. Proponowane metody pozwalają na pomiar bardzo małych prędkości przepływu oraz dodatkowo na wyznaczenie jego zwrotu. Istotną sprawą jest również niezależność wyniku od stałych kalibracyjnych czujnika – pomiar jest absolutny.

Dalsze badania będą polegały na eksperymentalnej weryfikacji przedstawionych metod pomiaru, a także ich udoskonaleniu. Podjęte starania będą miały na celu skrócenie czasu pomiaru metodą analizy czasowej oraz zwiększenie dopuszczalnego zakresu prędkości w metodzie analizy częstotliwościowej.

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

Literatura

- [1] Kielbasa J. *Measurement of gas flow velocity: Anemometer with a vibrating hot wire*, Review of Scientific Instruments, Vol. 81, 2010.
- [2] Kielbasa J. *Bezwzględna metoda pomiaru prędkości przepływu z anemometrem z drgającym grzanym włóknem*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, T. 10, Nr 1-4, 2008.
- [3] Moulin A. M., Gaster M., Woodburn C. N., Barnes J. R., Welland M. E. *A directionally sensitive hot-wire anemometer*, Experiments in Fluids, Vol. 22, 1997.
- [4] Li Y., Naguib A. *An oscillating hot-wire technique for resolving the magnitude and direction of velocity measurements using single hot-wire sensors*, Experiments in Fluids, Vol. 24, 2003.
- [5] Li Y., Naguib A. *High-frequency oscillating hot-wire sensor for near-wall diagnostics in separated flows*, AIAA J, Vol. 43, No. 3, 2005.
- [6] Persoons T., Hoefnagels A., Van den Bulck E. *Calibration of an oscillating hot-wire anemometer for bidirectional velocity measurements*, Experiments in Fluids, Vol. 40, 2006.
- [7] Brunn H.H.: *Hot-wire anemometry: Principles and Signal Analysis*, Oxford University Press, 1995.
- [8] Press W.H.: *Numerical recipes: the art of scientific computing*, Cambridge University Press, 2007.
- [9] Zieliński T.P.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów: od teorii do zastosowań*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005.
- [10] DISA Information: Low velocity anemometer, No. 7, 1969.

Methods of signal analysis from anemometer with vibrating hot wire

Abstract

Article includes an overview and simulation results of gas flow velocity measurement methods by means of anemometer with vibrating hot wire (oscillating hot wire anemometer). Hot wire probe, placed perpendicular to the velocity is set to sinusoidal vibrations. First of presented methods consists on determine vibration's amplitude, when gas flow velocity and oscillations speed are equal. This is done by analyzing the second derivate of anemometer voltage. Second method bases on frequency analysis of voltage. It enables very low velocity measurement. Both methods are absolute methods – measurement's result is independent from parameters describing hot wire probe.

Keywords: anemometer with vibrating hot wire, absolute measurements, low velocity measurement