

Konrad PAPIERZ, Jan KIEŁBASA

INSTYTUT MECHANIKI GÓROTWORU PAN, PRACOWNIA METROLOGII PRZEPLYWÓW,  
ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

## Pomiar prędkości przepływu powietrza anemometrem z drgającym grzonym włóknem

Mgr inż. Konrad PAPIERZ

W roku 2009 ukończył studia na wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej. Od 2010 roku pracuje w Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górniczo – Hutniczej PAN w Krakowie. Zainteresowania naukowe dotyczą metrologii wielkości nieelektrycznych, konstruowania przyrządów pomiarowych opartych na mikrokontrolerach oraz cyfrowego przetwarzania sygnałów.



e-mail: papierz@img-pan.krakow.pl

Prof. dr hab. Jan KIEŁBASA

Absolwent kierunku fizyka na Wydziale Mat-Fiz-Chem Uniwersytetu Jagiellońskiego w roku 1962. Doktorat 1969 i habilitacja 1976 na Wydziale Górniczym Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Tytuł profesora otrzymał w 1993 r. Przez całe życie zawodowe pracuje w Instytucie Mechaniki Górniczo – Hutniczej PAN w Krakowie, aktualnie jako profesor zwyczajny. Zajmuje się pomiarami wielkości nieelektrycznych w szczególności pomiarami prędkości przepływu.



e-mail: kielbasa@img-pan.krakow.pl

### Streszczenie

Artykuł zawiera omówienie metod pomiaru prędkości przepływu gazu anemometrem z drgającym grzonym włóknem. W rozwiązaniu tym czujnik termooanemometryczny umieszczony prostopadle do przepływu poddawany jest sinusoidalnym drganiom. Pomiar prędkości może być wykonany dwoma metodami. Obie metody są metodami absolutnymi – wynik pomiaru jest niezależny od współczynników charakteryzujących czujnik termooanemometryczny. Zaprezentowane zostały także wyniki przeprowadzonych, wstępnych pomiarów.

**Słowa kluczowe:** anemometr z drgającym grzonym włóknem, absolutny pomiar prędkości przepływu gazu, pomiar małych prędkości.

### Air velocity measurements by anemometer with vibrating-hot wire

#### Abstract

The paper contains discussion on gas flow velocity measurements made by an anemometer with a vibrating hot wire (oscillating hot-wire anemometer). The hot-wire anemometric sensor placed perpendicular to the flow direction is subjected to sinusoidal vibrations. The first of two methods presented in the paper consists in determination of the vibration amplitude for which the equalization of the flow velocity with the vibration velocity takes place. This is realized by analysis of the waveform of the hot-wire anemometric voltage second derivative. The second method is based on frequency analysis of the voltage. It allows taking measurements of very low velocities. Both these methods are absolute ones – the obtained results are independent of coefficients characterizing the hot-wire anemometric sensor, which is a great advantage. The measurement results are presented and compared with simulated waveforms – obtained by one of the discussed method and by solving the hot-wire heat balance equation.

**Keywords:** anemometer with vibrating hot-wire, absolute gas velocity measurement, low velocity measurement.

### 1. Wstęp

Koncepcja termooanemometru z drgającym grzonym włóknem została zaproponowana w 1969 roku przez duńską firmę DISA. Nowa, umożliwiająca dokonanie pomiaru prędkości przepływu gazu niezależnego od współczynników opisujących charakterystykę prędkościowo-napięciową czujnika metoda pomiaru została opisana w [1]. W niniejszej pracy autorzy proponują sposób jej implementacji, a także rozwinięcie, zwiększające możliwości.

### 2. Teoria pomiaru

Dla bardzo małych prędkości  $v(t)$  przepływu gazu napięcie  $u(t)$  termooanemometru 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,  $t$  oznacza czas.

Czujnik umieszczony prostopadle do wektora prędkości przepływu poddawany jest sinusoidalnym drganiom o amplitudzie  $x_0$  i częstotliwości  $f$  w płaszczyźnie równoległej do wektora prędkości. Prędkość sondy względem układu współrzędnych będzie zatem dana wzorem:

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

Napięcie na grzonym włóknem, 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  $u(v_{ef}(t))$  termooanemometru z drgającym, grzonym włóknem:

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

### 3. Pomiar prędkości na podstawie analizy czasowej

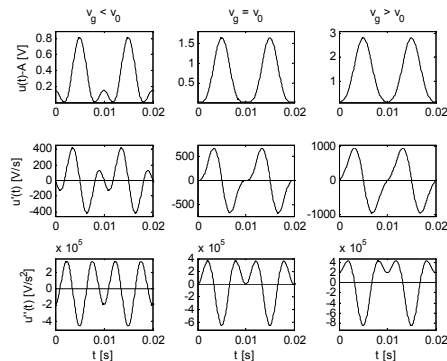
Przedstawiona powyżej prędkość efektywna może ona być cały czas dodatnia, przyjmować przez część okresu wartość ujemną, bądź też posiadać w okresie dokładnie jedno miejsce zerowe - gdy  $v_g = v_0$ . Doprowadzenie podczas pomiaru do ostatniego z przedstawionych przypadków umożliwia łatwe wyznaczenie prędkości gazu – należy w tym celu zmierzyć jedynie amplitudę drgań sondy  $x_0$  oraz ich częstotliwość  $f$ :

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

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

Rys. 1 przedstawia przebiegi czasowe napięcia (z odjętą stałą  $A$ ) oraz jego pierwszej i drugiej pochodnej dla wszystkich trzech omawianych przypadków. 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. Dla rzeczywistych sygnałów należy zastosować odpowiednie algorytmy obliczania pochodnych z jednoczesnym ich wygładzaniem (np. algorytm Savitzky'ego – Golay'a). Niewątpliwie mniej wrażliwa na zakłócenia byłaby analiza samego sygnału napięciowego. Jednakże wtedy do okre-

ślenia poszukiwanego momentu niezbędna jest znajomość stałej kalibracyjnej  $A$ . Tak więc pomiar przestałby być absolutny.



Rys. 1. Przebiegi czasowe sygnału napięcia i jego pochodnych  
Fig. 1. Waveforms of voltage and their derivatives

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 - czyli doprowadzenie do sytuacji gdy  $v_g = v_0$ .

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  $v_0 = 2\pi x_0 f$ . Jej wartość w punkcie możliwego wystąpienia trzeciego miejsca zerowego dana jest wzorem:

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

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 podzielony jest na kilka równych części wyznaczających krok zmiany amplitudy drgań. Dla każdej z tych amplitud mierzona jest 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.

#### 4. Pomiar prędkości na podstawie analizy częstotliwościowej

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

$$u(v_{ef}(t)) = A + Bv_g^2 + \frac{Bv_0^2}{2} - 2Bv_g v_0 \cos(2\pi ft) + \frac{Bv_0^2}{2} \cos(2 \cdot 2\pi ft). \quad (8)$$

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

$$h_1 = 2Bv_g v_0, \quad h_2 = \frac{Bv_0^2}{2} \quad (9)$$

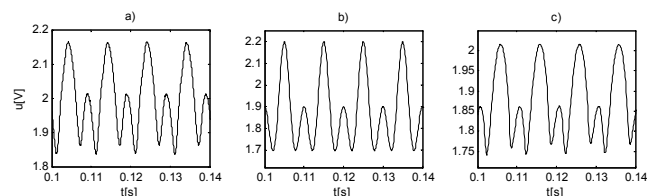
Przekształcając powyższe wzory można wyznaczyć prędkość przepływu gazu, niezależną od stałej  $B$ :

$$v_g = \frac{v_0 h_1}{4h_2} = \frac{\pi f x_0 h_1}{2h_2}. \quad (10)$$

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 mniejsza wrażliwość na zakłócenia pojawiające się w sygnale. Ponadto nie ma konieczności wykrycia momentu gdy  $v_g = v_0$ . Pomiar może być dokonany w dowolnym momencie.

#### 5. Wyniki pomiarów, symulacja w oparciu o równanie bilansu ciepłego włókna

Przeprowadzone eksperymenty pomiarowe pozwoliły na zaobserwowanie spodziewanego efektu zmiany kształtu sygnału napięcia (rys. 2 a). Stwierdzono także pewną rozbieżność w stosunku do omówionych w punkcie 3 symulacji (rys. 2 b). Przesunięcie fazowe między pierwszą, a drugą harmoniczną jest inne niż wynika to z symulacji - stąd pojawiająca się niesymetryczność w tej części sygnału.



Rys. 2. Wyniki pomiarów (a) oraz symulacji (b, c)  
Fig. 2. Results of measurements (a) and simulations (b, c)

W celu zbadania tego zjawiska przeprowadzone zostały symulacje w oparciu o równanie bilansu ciepłego czujnika. Rozwiązując numerycznie równanie bilansu ciepłego otrzymamy przebieg temperatury włókna  $T_w$  w czasie, w sytuacji gdy czujnik jest poddawany oscylacjom. Mając daną temperaturę włókna, określamy jego rezystancję i ostateczne napięcie (rys. 2 c). Jak widać wyniki te cechują się większą zgodnością z przeprowadzonymi pomiarami. Cechuje je jednak większa złożoność obliczeniowa, a także niemożność otrzymania rozwiązania analitycznego - bez przyjęcia dodatkowych uproszczeń można wyznaczyć jedynie rozwiązanie numeryczne. Obecnie trwają prace polegające na połączeniu dwóch omówionych rozwiązań, w celu uzyskania metody pomiaru prędkości przepływu, której wynik nie będzie zależał od zmiennych w czasie czynników zewnętrznych oraz parametrów sondy.

#### 6. Literatura

- [1] Kielbasa J.: Measurement of gas flow velocity: Anemometer with a vibrating hot wire, Review of Scientific Instruments, Vol. 81, 2010.
- [2] Papier K., Kielbasa J.: Metody pomiaru prędkości przepływu powietrza anemometrem z drgającym grzanym włóknem, mat. konf. Podstawowe Problemy Metrologii, 2011.
- [3] Papier K., Kielbasa J.: Methods of velocity measurement by the anemometer with a vibrating hot-wire, Archives of Mining Sciences, Vol. 56, Issue 1, 2011.
- [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. 34, 2003.