

Koncepcja pomiaru małych prędkości przepływu w oparciu o zjawisko złożenia dwóch fal temperaturowych

PAWEŁ LIGEZA

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono nowy wariant metody fal temperaturowych, wykorzystujący dwa połączone szeregowo nadajniki fali i pojedynczy detektor. Metoda oparta jest o zjawisko złożenia dwóch fal temperaturowych. Może ona znaleźć zastosowanie w szczególności w przenośnych przyrządach pomiarowych, mikro-przepływomierzach i układach pomiarowych w technologii MEMS.

Słowa kluczowe: pomiar prędkości przepływu, zakres małych prędkości, fale temperaturowe, pomiar bezwzględny, przyrządy przenośne

1. Wprowadzenie

Szereg klasycznych metod pomiarowych, takich jak metody mechaniczne bazujące na przekazaniu pędu czy metody ciśnieniowe w zakresie małych prędkości przepływu jest nieprzydatna [1]. Często stosowana w tych zagadnieniach metoda termooanemometryczna nie jest metodą bezwzględną, a więc wymaga wzorcowania. Ponadto termooanemometria jest wrażliwa na parametry przepływu takie jak temperatura, skład gazu, wilgotność czy ciśnienie [2]. Korzystnym rozwiązaniem jest stosowanie metod znacznikowych, opartych na pomiarze czasu przelotu znacznika przepływu na zadanej drodze. Istnieje wiele metod wykorzystujących różnorodne znaczniki. Przykładowo metody LDA i PIV wykorzystują wprowadzony do przepływu posiew stanowiący znacznik optyczny [3]. Niestety wprowadzenie posiewu w wielu zastosowaniach ze względu na wymaganą czystość obszaru jest niemożliwe. Ponadto są to metody stosunkowo złożone i nie jest możliwa realizacja tanich, przenośnych przyrządów pomiarowych.

W pracy [4] zaproponowano metodę pomiaru prędkości w oparciu o badanie propagacji naturalnych fluktuacji prędkości, temperatury czy ciśnienia istniejących w przepływie. Jednak w omawianej klasie zagadnień metrologicznych fluktuacje te są znikome i nie stanowią dobrego znacznika przepływu. Dobrym i często stosowanym rozwiązaniem jest wywołanie w przepływie fluktuacji temperatury i pomiar prędkości ich propagacji. Najprostsze rozwiązanie złożone z nadajnika i detektora nie pozwala na precyzyjny pomiar prędkości ze względu na inercję cieplną tych elementów i związany z tym błąd pomiaru czasu przelotu zaburzenia. Jednym z najnowszych rozwiązań w tej dziedzinie jest metoda zaproponowana w pracach [5, 6]. Wykorzystuje ona pojedynczy nadajnik periodycznej fali temperaturowej oraz dwa detektory temperatury umieszczone w bazowej odległości od siebie. Pozwala to na eliminację inercji cieplnej nadajnika, a przy założeniu identyczności obu torów detekcji ograniczony jest wpływ inercji cieplnej detektorów. Ponadto złożona analiza spektralna sygnałów z detektorów pozwala na prowadzenie precyzyjnych pomiarów.

Niniejsza praca przedstawia koncepcję modyfikacji tej metody pozwalającą na uproszczenie układu pomiarowego przy zachowaniu zbliżonych parametrów metrologicznych. Modyfikacja ta pozwala na implementację metody w przenośnym przyrządzie pomiarowym zbudowanym w oparciu o standardowy pojedynczy mikrokontroler. Modyfikacja metody jest przedmiotem zgłoszenia patentowego [7].

2. Koncepcja metody pomiarowej

Przedstawiona w pracy [6] metoda pomiarowa wykorzystuje pojedynczy nadajnik fali temperaturowej oraz dwa detektory temperatury rozmieszczone w zadanej odległości. Analiza spektralna sygnałów z detektorów pozwala na wyznaczenie prędkości przepływu. Powstała koncepcja nowego rozwiązania, w którym budowa czujnika jest zbliżona, odmienny natomiast jest proces pomiarowy. Czujnik zbudowany jest również z trzech elementów umieszczonych kolejno na linii prądu przepływu, przy czym dwa z nich pełnią funkcję nadajników fali temperaturowej, a trzeci jest detektorem. Nadajniki umieszczone są w zadanej odległości Δx od siebie, natomiast elektrycznie połączone są szeregowo. Zasilane są ze wspólnego układu generacji fali, natomiast w przepływie generowane są dwie fale temperaturowe przesunięte w fazie względem siebie. Te dwa sygnały docierają do pojedynczego detektora temperatury. Wykorzystano tu nakładanie się dwóch fal temperaturowych. Przesunięcie fazowe $\Delta\varphi$ sygnałów sinusoidalnych o częstości kontowej w docierających do detektora opisuje zależność:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x \omega}{V_T} \quad (1)$$

gdzie: V_T – jest prędkością propagacji fali temperaturowej w przepływie. Ze względu na zjawisko dyfuzji cieplnej prędkość V_T nie jest tożsama z prędkością przepływu V . W pracy [5] wyprowadzono związek tych prędkości w postaci:

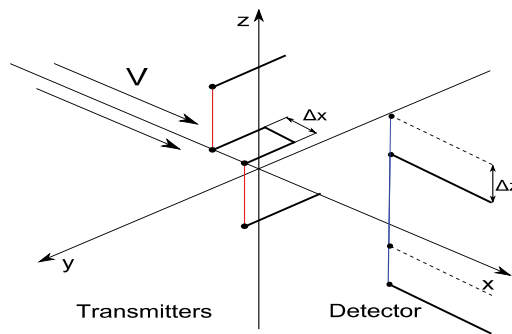
$$V = V_T \sqrt{1 - \frac{4\kappa^2 \omega^2}{V_T^4}} \quad (2)$$

gdzie: κ – jest współczynnikiem dyfuzji cieplnej ośrodka. Zgodnie z (2) znając prędkość V_T propagacji fali temperaturowej w przepływie oraz współczynnik dyfuzji cieplnej κ można wyznaczyć mierzoną prędkość przepływu. Z analizy równania (2) wynika, że w początkowym zakresie prędkość propagacji fali temperaturowej jest większa od prędkości przepływu, natomiast od pewnej prędkości można przyjąć, że obie prędkości są praktycznie równe. Prędkość propagacji fali temperaturowej w proponowanej metodzie wyznaczana jest następująco. Zakładając addytywny charakter składowych zmiennych sygnałów z obu nadajników docierających do detektora, możemy opisać sygnał A_T rejestrowany przez detektor następującą zależnością:

$$A_T(t) = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(\omega t + \Delta\varphi) \quad (3)$$

gdzie: A_1, A_2 – amplitudy sygnałów z pierwszego i drugiego nadajnika. Po przekształceniach z równania (3) otrzymujemy:

$$A_T(t) = 2 A_1 \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \sin\left(\omega t + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) + (A_2 - A_1) \sin(\omega t + \Delta\varphi) \quad (4)$$



Rys. 1. Schemat budowy czujnika pomiarowego

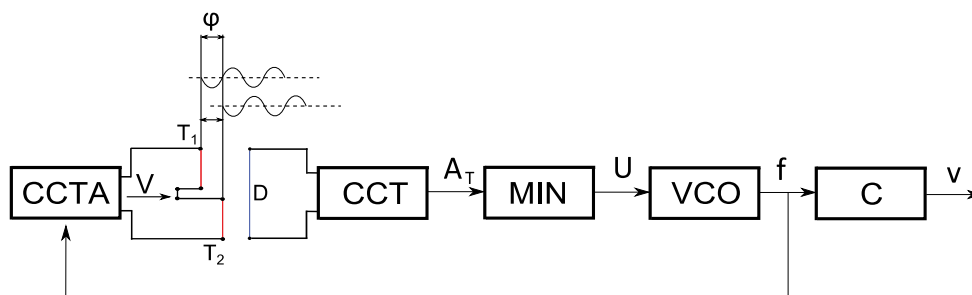
W proponowanej metodzie zamiast złożonej analizy spektralnej proponuje się detekcję amplitudową odbieranego sygnału, stanowiącego superpozycję dwóch fal temperaturowych. Przy założeniu równości

amplitud $A_1 = A_2$ zgodnie z równaniem (4) istnieje taka minimalna wartość pulsacji ω dla której przesunięcie fazowe $\Delta\varphi = \pi$, a sygnał na detektorze zeruje się. Znając wartość pulsacji ω dla której $A_T(t) = 0$ możemy z zależności (1) wyznaczyć prędkość propagacji fali temperaturowej:

$$V_T = \frac{\Delta x \omega}{\pi} \quad (5)$$

a mierzoną prędkość przepływu wyznaczyć zgodnie z (2).

Konstrukcja czujnika pomiarowego znajdującego zastosowanie w proponowanej metodzie przedstawiona jest schematycznie na rysunku 1. Dla spełnienia warunku równości amplitud z obu nadajników detektor przesunięty jest w osi z o taką wartość, aby uzyskać wyrównanie amplitud. Nadajniki elektrycznie połączone są szeregowo i zasilane wspólnym sygnałem, natomiast przestrzennie przesunięte są względem siebie w osi z , aby nie oddziaływały aerodynamicznie i termicznie ze sobą. Odległość między nadajnikami w kierunku przepływu wynosi Δx , natomiast odległość detektora od nadajników nie wpływa bezpośrednio na pomiar prędkości. Schemat blokowy proponowanego przyrządu pomiarowego realizującego opisaną metodę przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy przyrządu pomiarowego

Nadajniki fali temperaturowej zasilane są ze wspólnego sterowanego układu stałotemperaturowego CCTA [8]. Układ ten zasila nadajniki w taki sposób, aby ich temperatura zmieniała się zgodnie z przebiegiem sygnału sterującego f . Sygnały z nadajników docierają do detektora pracującego w układzie stałoprądowego termometru rezystancyjnego CCT. Sygnał A_T proporcjonalny do temperatury detektora podawany jest do regulatora MIN. Zadaniem tego bloku jest wytworzenie sygnału U sterującego generator sinusoidalny przestrajany napięciem VCO w taki sposób, aby minimalizować amplitudę sygnału z detektora. W ten sposób przesunięcie fazowe sygnałów na detektorze utrzymywane jest automatycznie na wartości π , a pulsacja ω jest miarą prędkości. Prędkość ta wyznaczana jest w bloku C zgodnie z równaniami (2) i (5). Dla sprawdzenia przyjętych założeń konieczne jest przeprowadzenie eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metody. Wstępne badania potwierdzają możliwość zastosowania tej metody w wybranej klasie zagadnień metrologicznych.

3. Konkluzja

Zaproponowana metoda pozwala na dokonywanie pomiaru bardzo małych prędkości przepływu powietrza i innych gazów, przy czym jest mało inwazyjna i nie wymaga wzorcowania. Ponadto pomiar jest mało wrażliwy na zmiany temperatury, ciśnienia, składu czy wilgotności medium. Przewiduje się możliwość zastosowania opisanej metody pomiarowej jako metody komplementarnej do opisanej w pracy [6], w szczególności w przenośnych przyrządach pomiarowych zbudowanych w oparciu o pojedynczy mikrokontroler, w przepływomierzach i mikro-przepływomierzach, a także w czujnikach i układach pomiarowych zbudowanych w technologii MEMS [9]. Metoda pozwala na bezwzględny (absolutny) pomiar prędkości przepływu w zakresie bardzo małych prędkości. Ze względu na małe rozmiary czujnika pomiar ma charakter *quasi*-punktowy, a inwazyjność pomiaru jest znikoma. Wynik pomiaru bez korekcji związanej z dyfuzją cieplną jest obciążony błędem w początkowym zakresie prędkości. Możliwa jest korekcja tego błędu, wymaga to jednak znajomości współczynnika dyfuzyjności cieplnej badanego medium.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2012/07/B/ST8/03041: „Badania przestrzennej propagacji oraz optymalizacja metod generacji, detekcji i analizy fal temperaturowych w aspekcie bezwzględnego pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności cieplnej gazów”

Literatura

- [1] Choon T.W., Prakash C., Aik L.E., Hin T.T.: *Development of Low Wind Speed Anemometer*. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology 2, 3, (2012), p. 39-42.
- [2] Sattarzadeh S.S., Kalpakli A., Örlü R.: *Hot-Wire Calibration at Low Velocities: Revisiting the Vortex Shedding Method*. Advances in Mechanical Engineering, 2013 (2013), p. 1-6.
- [3] Cao X., Liu J., Jiang N., Chen Q.: *Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications*. Energy and Buildings, 69, (2014), p. 367-380.
- [4] Ligęza P.: *Use of Natural Fluctuations of Flow Parameters for Measurement of Velocity Vector*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 63, 3 (2014), p. 633-640.
- [5] Rachalski A.: *High-precision anemometer with thermal wave*. Rev. of. Sci. Instr. 77, 9, (2006).
- [6] Rachalski A.: *Absolute measurement of low gas flow by means of the spectral analysis of the thermal wave*. Rev. of. Sci. Instr. 84, 2, (2013).
- [7] Kęsek D., Ligęza P.: *Sposób pomiaru prędkości przepływu cieczy i gazów oraz elektroniczny anemometr z falą temperaturową*. Zgłoszenie patentowe P-407862 (2014).
- [8] Ligęza P.: *A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications*. Review of Scientific Instruments, 71, 1, (2000), p. 109-112.
- [9] Liu H-B., Lin N., Pan S.-S., Miao J., Norford, L.K.: *High Sensitivity, Miniature, Full 2-D Anemometer Based on MEMS Hot-Film Sensors*. Sensors Journal, IEEE, 13, 5, (2013), p. 1914-1920.

Conception of low velocity flow measurement based on the phenomena of submission of two temperature waves

Abstract

This study presents a conception of low velocity flow measurement method implementing two transmitters of temperature waves connected in series and a single detector. The main principle of the method is based on the phenomenon of submission of temperature waves. The method may find its application especially in mobile measurement devices, micro flow meters and measurement circuits based on MEMS technology.

Keywords: flow velocity measurement, low velocity range, absolute measurement, temperature waves, mobile instruments