

Wykorzystanie sygnału typu MBS do pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności temperaturowej powietrza w anemometrze z falą cieplną

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie fal cieplnych do równoczesnego pomiaru niewielkich prędkości przepływu powietrza oraz dyfuzyjności temperaturowej. Idea metody polega na analizie spektralnej sygnału fali cieplnej. Źródłem fali jest sygnał temperaturowy typu MBS (Multifrequency Binary Sequences). Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów dla prędkości przepływu powietrza w zakresie 10-80 cm/s.

Abstract. This paper presents the method of simultaneous measurement of low flow air velocity and thermal diffusivity. The idea of measurement consist of spectral analysis of thermal wave signal. As a wave source the thermal MBS signal was applied. Some results of measurements for air flow of range 10-80 cm/s were presented. **(Applying of MBS signal for air flow velocity and thermal diffusivity measurement).**

Słowa kluczowe: fale temperaturowe, termoanemometria, pomiar prędkości przepływu, dyfuzyjność cieplna.

Key words: thermal waves, thermal anemometry, flow velocity measurement, thermal diffusivity.

doi:10.12915/pe.2014.08.40

Wstęp

Fale cieplne w gazach rozchodzą się za pomocą dwóch zjawisk: dyfuzji cieplnej oraz konwekcji w płynącym ośrodku. Na tej podstawie można mierzyć prędkość przepływu gazu oraz jego dyfuzyjność temperaturową. W nieruchomym (względem źródła fali) gazie fala temperaturowa rozchodzi się jedynie za pomocą dyfuzji. W przepływającym gazie występują oba mechanizmy propagacji fali. Dlatego też pomiary dyfuzyjności cieplnej przeprowadza się w spoczywającym gazie, natomiast w przypadku pomiaru prędkości przepływu zjawisko dyfuzji cieplnej należy uwzględnić wzorczując uprzednio czujnik, lub przeprowadzić pomiar w takich warunkach aby wpływ dyfuzji na prędkość propagacji fali cieplnej można było pominąć.

Technika pomiaru prędkości przepływu polega na pomiarze czasu przelotu fali na znanej odległości. W tym celu w badanym przepływie umieszcza się źródło fali cieplnej, którym jest nagrzewany okresowo element. W pewnej odległości od źródła, zgodnie z kierunkiem przepływu znajduje się jeden lub dwa detektory fali cieplnej, w postaci termometrów rezystancyjnych.

Podstawy teoretyczne metody

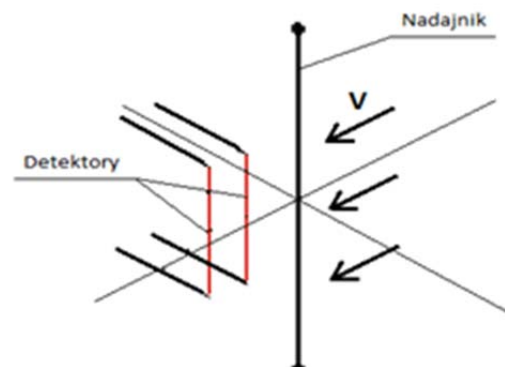
Do analizy zjawiska propagacji fal cieplnych w płynącym gazie stosujemy równanie adwekcji-konwekcji:

$$(1) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\kappa \text{grad} T) - v_G \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{Q(t)}{\rho c}$$

gdzie: T - temperatura gazu, κ - dyfuzyjność cieplna gazu, ρ - gęstość gazu, c - ciepło właściwe gazu, v_G - prędkość przepływu, $Q(t)$ - gęstość mocy źródła.

Założono tu, że prędkość przepływu gazu wokół źródła fali jest stała, a parametry gazu nie zmieniają się z temperaturą. Dla sinusoidalnego źródła fali o częstotliwości ω Kiełbasa [1] przedstawił rozwiązanie na przesunięcie fazowe fali temperaturowej, które dla układu przedstawionego na rysunku 1 przyjmuje postać:

$$(2) \quad \Delta\varphi(x, \omega, \kappa, v_G) = \frac{v_G \Delta x}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\kappa^2 \omega^2}{v_G^4}} - 1 \right)}$$



Rys. 1. Konfiguracja przestrzenna sondy pomiarowej.

Analiza równania (2) pokazuje, że dla:

$$(3) \quad \frac{16\kappa^2 \omega^2}{v_G^4} \ll 1$$

otrzymujemy zależność:

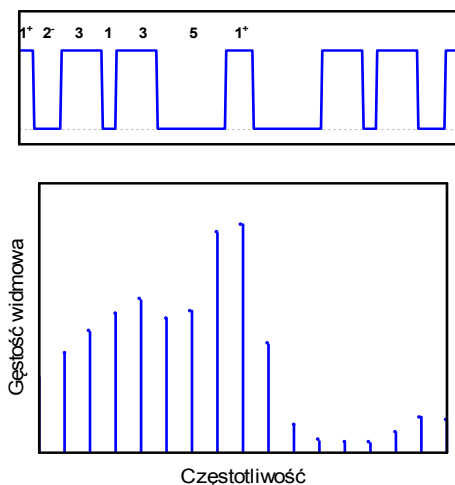
$$(4) \quad \Delta\varphi = \frac{\omega \Delta x}{v_G}$$

a więc przesunięcie fazy nie zależy od dyfuzyjności. Aby wyznaczyć równocześnie prędkość przepływu i dyfuzyjność należy tak dobrać częstotliwość fali aby zależność fazy od częstotliwości była nieliniowa. W równaniu (2) występują dwie niewiadome wielkości: prędkość przepływu gazu v_G oraz jego dyfuzyjność cieplna κ . Jeżeli zastosujemy ciąg fal o częstotliwościach ω , to otrzymujemy wówczas układ równań:

$$(5) \quad \Delta\varphi_i(x, \omega_i, \kappa, v_G) = \frac{v_G \Delta x}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\kappa^2 \omega_i^2}{v_G^4}} - 1 \right)}$$

który, z uwagi na niedokładności pomiaru przesunięcia fazy może być sprzeczny, i dlatego rozwiązujemy go metodą estymacji nieliniowej, dopasowując zmierzone przesunięcia fazowe dla fal o różnych częstotliwościach. Dotychczas stosowano sygnał będący sumą sygnałów sinusoidalnych o różnej częstotliwości [2]. Wygodniejsze jest użycie sygnału typu MBS (Multifrequency Binary Sequences). Są to ciągi fal

prostokątnych, charakteryzujące się tym, że przeważająca część mocy sygnału jest skupiona w kilku – kilkunastu wybranych harmonicznym. W niniejszej pracy posłużono się sygnałem Stratchclyde MBS s.1-8 [3]. Pierwszych 8 składowych harmonicznym zawiera 76.7% mocy tego sygnału. Wyznaczenie prędkości przepływu oraz dyfuzyjności wymaga rozłożenia sygnału na składowe harmoniczne, obliczenia różnicy faz dla odpowiednich częstotliwości, a następnie rozwiązania układu równań (3). Metoda ta jest poprawna pod warunkiem, że dyfuzyjność cieplna nie zależy od temperatury. Można wówczas zastosować równanie (2) i ponieważ jest ono liniowe, to składowe harmoniczne sygnału rozchodzą się niezależnie.



Rys.2. Sygnał typu MBS Stratchclyde 1- 8 oraz jego widmo.

Rysunek 2 przedstawia zastosowany sygnał typu MBS oraz jego widmo częstotliwościowe.

Opis eksperymentu

Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym dla prędkości przepływu powietrza w zakresie od 0,1 do 1 m/s, w temperaturze pokojowej. Jako nadajnika fali użyto sondy z drutu wolframowego o długości 10 mm i średnicy 8 μm . Nadajnik pracował w układzie stałotemperaturowym ze zmienną wartością współczynnika nagrzania. Do zasilania nadajnika zastosowano bezmostkowy anemometr cyfrowy CCC'2002 [4]. Detektory zostały wykonane z drutu wolframowego o długości 5 mm i średnicy 5 μm . Odległość między detektorami wynosiła 2 mm. Sygnały napięciowe z detektorów były przesyłane za pośrednictwem kart przetworników A/C do komputera, a następnie poddawane obróbce cyfrowej.

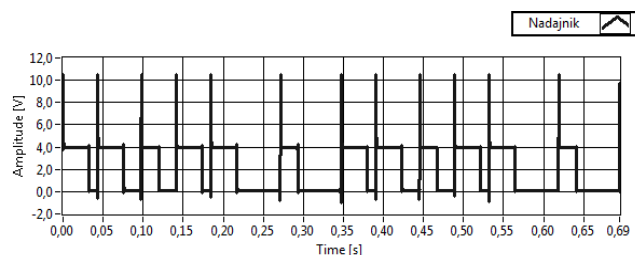
Wyniki

Przebieg sygnału MBS na nadajniku fali ilustruje rys.3, natomiast rys.4 przedstawia przebiegi sygnałów na detektorach dla różnych prędkości przepływu powietrza.

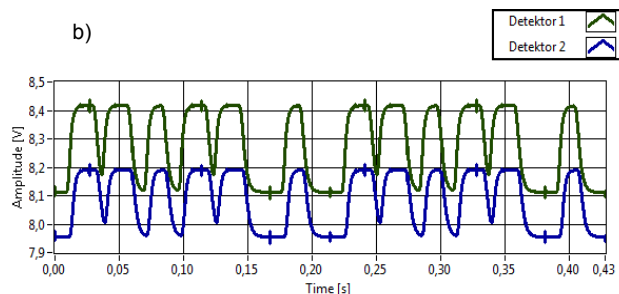
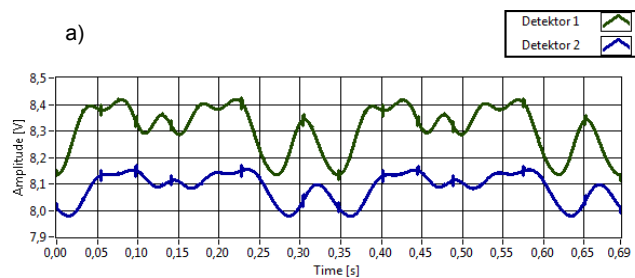
Nadajnik działa w układzie stałotemperaturowym ze zmienną wartością współczynnika nagrzania. Na sygnale napięciowym odznaczają się chwilowe skoki napięć związane z zmianą współczynnika nagrzania. Drut nadajnika nie jest nagrzewany do temperatury odpowiadającej napięciu zatem nie wpływa to na przebieg sygnałów na detektorach. Natomiast dzięki tym skokom napięć możliwe jest bardzo dokładne wyznaczenie okresu przebiegu sygnału.

Dla niewielkich prędkości wpływ dyfuzyjności cieplnej jest znaczny (rys.3a). Widać zniekształcony przebieg sygnału napięciowego na detektorach fali. Natomiast dla

wyższych prędkości (rys.3b) wpływ dyfuzyjności maleje, przebieg sygnału napięciowego jest zbliżony kształtem do przebiegu sygnału na nadajniku.

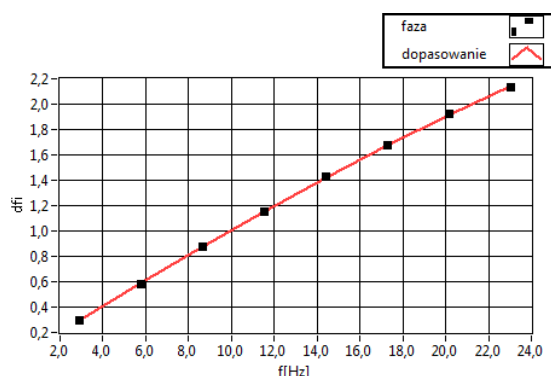


Rys.3. Przebiegi sygnału napięciowego MBS na nadajniku fali.

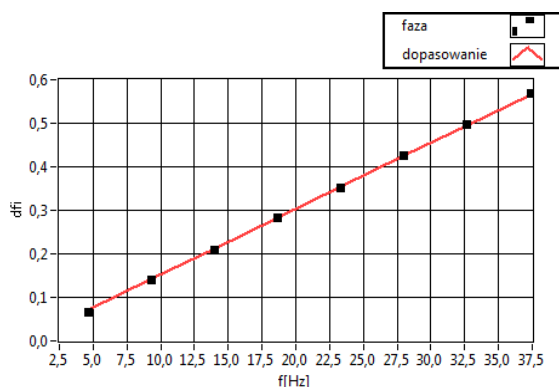


Rys.4. Przebiegi sygnału napięciowego na nadajniku oraz detektorach fali dla prędkości przepływu: a) $v=12,43$ cm/s; b) $v=83,75$ cm/s.

Dla poszczególnych harmonicznym sygnałów na detektorach wyznaczono wartości przesunięcia fazowego w funkcji częstotliwości, a następnie dopasowano je do przewidzianej teoretycznie zależności (2) metodą estymacji nieliniowej. Rysunek 5 i 6 przedstawia wyznaczone wartości przesunięcia fazowego składowych harmonicznym sygnału oraz krzywe dopasowania.



Rys.5. Przesunięcia fazowe dla pierwszych ośmiu harmonicznym sygnału MBS dla prędkości zmierzonych $v=12,43$ cm/s



Rys.6. Przesunięcia fazowe dla pierwszych ośmiu harmonicznym sygnału MBS dla prędkości zmierzonych $v=83,75$ cm/s

Wyniki pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności temperaturowej powietrza wyznaczone dla różnych prędkości przepływu przedstawiono w tabeli 1. Dla najmniejszych prędkości nie odbiegają one od wartości podawanych w literaturze [5]. Obserwowany systematyczny wzrost wyznaczonych wartości dyfuzyjności z prędkością wskazuje, że rzeczywiste warunki pomiaru odbiegają od przyjętego modelu teoretycznego.

Tabela 1. Parametry czujnika

częstotliwość falownika [Hz]	v [cm/s]	κ [cm ² /s]
0,3	7,87	0,25
0,4	12,43	0,28
0,5	17,16	0,31
0,6	22,66	0,36
0,7	28,02	0,44
0,8	34,60	-
0,9	44,26	-
1	53,14	-
1,3	83,75	-

Wnioski

Wyniki wskazują na możliwość stosowania sygnału typu MBS dla anemometru z falą cieplną do pomiaru małych prędkości przepływu powietrza. Konieczne jest jednak, w dalszych pracach uwzględnienie i wyeliminowanie wpływu zjawiska cienia aerodynamicznego na wartości wyznaczanych prędkości. Pomiar dyfuzyjności powietrza jest poprawny tylko dla małych prędkości przepływu. Wskazuje to na niedoskonałość przyjętego modelu teoretycznego i wymaga dalszych badań.

Praca wykonana została w ramach projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki OPUS nr 2012/07/B/ST8/03041.

Pomiary przeprowadzono na tunelu aerodynamicznym zakupionym ze środków Funduszu Nauki i Technologii Polskiej, grant nr 682/FNiTP/34/2011

LITERATURA

- [1] J. Kielbasa, Fale cieplne w metrologii powolnych przepływów, Wyd. AGH, Kraków, 1976.
- [2] A. Rachalski, *Absolute Measurements of Very Low Gas Flow Velocity by Means of Spectral Analysis of Thermal Wave*, Rev. Sci. Instrum. vol.84, no2/2013, 025105.
- [3] L. Jackowska-Strumillo, D. Sankowski, J. McGhee, I.A. Henderson, *Modelling and MBS experimentation for temperature sensors*, Measurement, vol.20, no 1/1997, s.49-60.
- [4] P. Ligęza, *Four-point non-bridge constant-temperature anemometer circuit*, Exp. Fluids vol.29, no5/2000, s.505-507.
- [5] A. Mandelis, G. Pan, *Measurements of the thermodynamic equation of state via the pressure dependence of thermophysical properties of air by a thermal-wave resonant cavity*, Rev. Sci. Instrum. vol.69, no8/1998, s.2918-2923.

Dominik KĘSEK, Andrzej RACHALSKI

Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk