

Anemometr z sinusoidalną modulacją współczynnika nagrzania i jego praca w adaptacyjnym systemie komputerowym

JAN KIELBASA

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

Streszczenie

Praca dotyczy metody jednoczesnego pomiaru prędkości v przepływu medium, jego temperatury T_g i przesunięcia fazowego φ na grzanym włóknie za pomocą jednowłóknowej sondy termoanemometrycznej pracującej w układzie anemometru stałotemperaturowego, w którym moduluje się periodycznie współczynnik $N(t)$ nagrzania włókna. Opisywana metoda dotyczy przepływów z wolno zmieniającymi się parametrami w czasie.

Na skutek modulacji rezystancji pracy grzanego włókna zmienia się prąd zasilania proporcjonalny do mierzonego napięcia na rezystorze włączonym szeregowo z włóknem. Napięcie to jest poddane analizie furierowskiej, w wyniku której dostaje się zerową i pierwszą składową prądu zasilania włókna oraz przesunięcie fazowe pomiędzy prądem a sygnałem modulującym. Składowe te są funkcjami prędkości przepływu medium i jego temperatury. Rozwiązując otrzymane równania otrzymuje się poszukiwane wielkości.

Przedstawiana metoda stanowi rozwinięcie wcześniej publikowanego rozwiązania, w którym temperatura grzanego włókna była modulowana dwustanowo. Taka modulacja powodowała chwilowe przegrzania włókna, co generowało błędy w wyliczaniu tak prędkości jak i temperatury medium.

Słowa kluczowe: anemometr cieplny

1. Wprowadzenie

Zależność funkcyjną pomiędzy mocą odprowadzaną od nagrzanego włókna termoanemometrycznego a prędkością napływającego medium podał King w roku 1914 [1] w formule (2). Widzimy, że kształt wzoru jest analogiczny do prawa Newtona opisującego straty ciepła od nagrzanego ciała

$$Q = \alpha(T_w - T_g) . \quad (1)$$

W obu przypadkach po prawej stronie występuje różnica temperatur między temperaturą nagrzanego ciała T_w a temperaturą otoczenia T_g . We wzorze Kinga współczynnik α jest zależny dodatkowo od prędkości.

W anemometrze z grzanym włóknem informację o stratach cieplnych otrzymujemy w postaci napięciowej lub prądowej zależnie od trybu pracy. Ta informacja jest zatem funkcją dwu zmiennych – temperatury i prędkości. Stąd wydawało się niemożliwym aby czujnikiem z jednym grzanym włóknem można było mierzyć obie te wielkości. W pracy zastosowano metodę modulacji współczynnika nagrzania włókna pracującego w układzie anemometru stałotemperaturowego. Modulując współczynnik nagrzania dostaje się odpowiedni prąd zasilania włókna, który poddaje się procesowi rozkładu w szereg Fouriera. Ograniczając się do zerowej składowej prądu zasilania i pierwszej harmonicznej dostajemy dwie informacje, z których można wypreparować prędkość medium i jego temperaturę.

Ideę jednowłóknowego termoanemometru mierzącego jednocześnie prędkość przepływającego medium i jego temperaturę podał autor w 1991 roku [2]. Opierała się ona na cyklicznej dwustanowej zmia-

nie współczynnika nagrzania włókna, pomiarze napięcia, które wówczas występuje na grzonym włóknie i odpowiednim przetworzeniu tych danych. Szczegółowy opis metody podany jest w pracy doktorskiej P. Ligęzy [3]. Analogiczną metodę wykorzystującą sinusoidalną modulację napięcia niezrównoważenia mostka termooanemometrycznego, w którym pracuje grzane włókno opisali w roku 2000 R.P.C. Ferreira i inni w pracy [4]. Zespół z Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie opracował w 2003 roku komputerowy anemometr, w którym można programowo zmieniać współczynnik nagrzania włókna. Układ elektroniczny opracował P. Ligęza [5] a program sterujący pracą M. Gawor [6]. Anemometr ten wykorzystano dotychczas głównie do pomiarów modułów składowych wektora prędkości przepływu oraz do generacji fal cieplnych. W opisanym poniżej metodzie autor próbował wykorzystać wspomniany anemometr do wspomnianych wyżej celów.

2. Zarys teorii metody

Moc odprowadzona od nagrzanego włókna czujnika termooanemometrycznego w warunkach stacjonarnych opisana jest wzorem Kinga [1]

$$I^2 R_w = (a + b\sqrt{v})(T_w + T_g) \quad (2)$$

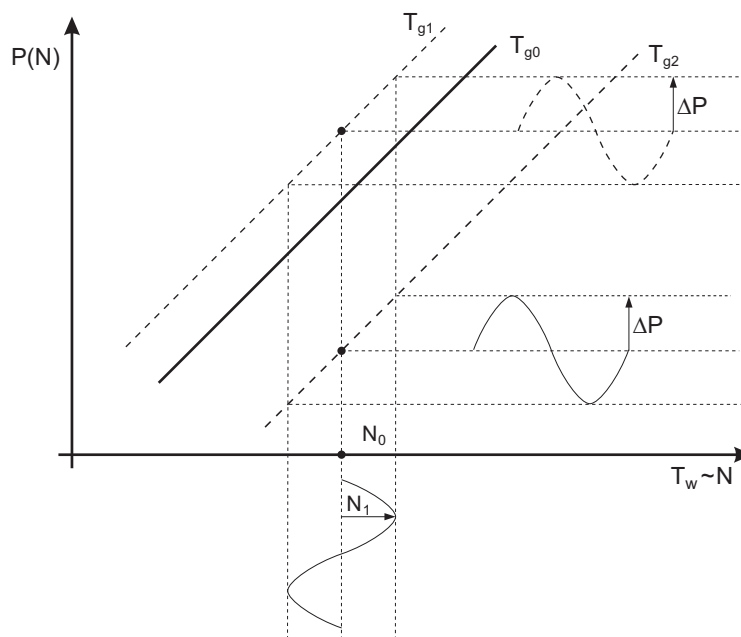
lub bardziej ogólnym

$$I^2 R_w = (a + bv^n)(T_w + T_g), \quad (3)$$

gdzie:

- I – prąd płynący przez grzane włókno,
- R_w – rezystancja nagrzanego włókna,
- T_w – temperatura grzanego włókna,
- T_g – temperatura płynącego medium,
- a, b i n – stałe, na ogół wyznaczone w procesie wzorcowania czujnika.

Jeżeli temperatura T_g medium zmienia się bardzo powoli to równania (2) i (3) są liniowymi równaniami ze względu na T_w a temperatura T_g pełni tu rolę parametru. Sytuację tę ilustruje rys. 1, gdzie na osi pionowej jest moc $P(N)$ a na poziomej temperatura włókna T_w proporcjonalna do współczynnika nagrzania N .



Rys. 1. Idea pracy anemometru z modulacją współczynnika nagrzania

W przypadku stosowania modulacji temperatury grzanego włókna należy w równaniach (2) lub (3) uwzględnić człon bezwładnościowy. I tak np. równanie (3) przyjmie postać

$$I^2 R_w = (a + bv^n)(T_w - T_g) + mc \frac{dT_w}{dt}, \quad (4)$$

gdzie m oznacza masę grzanego włókna a c ciepło właściwe materiału włókna. Pamiętając, że z dużym przybliżeniem możemy przyjąć że rezystancja włókna liniowo zależy od temperatury to można zapisać

$$R_w = R_0[1 + \gamma(T_w - T_0)], \quad (5)$$

$$R_g = R_0[1 + \gamma(T_g - T_0)], \quad (6)$$

gdzie R_0 oznacza rezystancję zimnego włókna w temperaturze odniesienia T_0 dla $v = 0$ a γ jest temperaturowym współczynnikiem rezystancji materiału włókna.

Ze wzorów (5) i (6) dostaje się

$$T_w - T_g = \frac{R_w - R_g}{\gamma R_0} \quad (7)$$

oraz

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\gamma R_0} \frac{dR_w}{dt}, \quad (8)$$

a stąd po podstawieniu do równania (4) dostaje się

$$I^2 R_w = \frac{(a + bv^n)}{\gamma R_0} (R_w - R_g) + \frac{mc}{\gamma R_0} \frac{dR_w}{dt}. \quad (9)$$

W czasie pracy przyrządu parametrem zadawanym jest $R_w(t)$ a odpowiedzią jest $i(t)$. Rezystancję R_w zadaje się komputerowo [5] zgodnie z relacją

$$R_w = R_{w0}(1 + k \sin \omega t), \quad (10)$$

gdzie R_{w0} oznacza średnią wartość rezystancji włókna a k głębokość modulacji. Zatem równanie (9) przyjmie postać

$$i^2(t) R_{w0}(1 + k \sin \omega t) = \frac{(a + bv^n)}{\gamma R_0} [R_{w0}(1 + k \sin \omega t) - R_g] + \frac{mck\omega}{\gamma R_0} \cos \omega t. \quad (11)$$

Rozwiązania $i(t)$ będzie się szukać w postaci szeregu

$$i(t) = \sum_0^n I_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (12)$$

gdzie I_n oznacza amplitudę i -tej harmonicznnej, φ_n przesunięcie fazowe i -tej harmonicznnej względem sygnału modulującego. Do dalszych rozważań ograniczymy się do postaci

$$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (13)$$

i wówczas

$$i^2(t) = [I_0 + I_1 \sin(\omega t + \varphi_1)]^2 \approx I_0^2 + \frac{I_1^2}{2} + 2I_0 I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) - \frac{I_1^2}{2} \cos(2\omega t + 2\varphi_1), \quad (14)$$

gdzie zakłada się, że $I_1 \ll 2I_0$.

Wstawiając (14) do (11) grupując i ograniczając się do pierwszej harmonicznnej otrzymuje się

$$(I_0^2 + \frac{I_1^2}{2}) R_{w0} = (R_{w0} - R_g) \frac{a + bv^n}{\gamma R_0} \quad (15)$$

i

$$2R_{w0}[I_0 I_1 \sin(\omega t + \varphi_1)] = kR_{w0} \left(\frac{a + bv^n}{\gamma R_0} - I_0^2 \right) \sin \omega t + \frac{mck\omega}{\gamma R_0} \cos \omega t. \quad (16)$$

Przekształcając (16) mamy

$$2R_{w0} I_0 I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) = [kR_{w0} \left(\frac{a + bv^n}{\gamma R_0} - I_0^2 \right)] \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} \sin(\omega t + \psi), \quad (17)$$

gdzie

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{mc\omega}{kR_{w0}(a + bv^n - \gamma R_0 I_0^2)} = \omega\tau \quad (18)$$

i

$$\tau = \frac{mc}{kR_{w0}(a + bv^n - \gamma R_0 I_0^2)}. \quad (19)$$

Porównując amplitudy i fazy we wzorze (17) i wykorzystując (15) dostaje się

$$I_1 = \frac{k}{2I_0} \left(\frac{a + bv^n}{\gamma R_0} - I_0^2 \right) \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (20)$$

oraz

$$\varphi_1 = \psi \quad (21)$$

i

$$I_0 = \sqrt{\frac{(R_{w0} - R_g)(a + bv^n)}{R_{w0} \gamma R_0}}. \quad (22)$$

We wzorach (20) i (22) wielkościami mierzonymi są I_0 , I_1 oraz ψ , nieznanymi są v i R_g , zadawanymi są R_{w0} , k , ω , wielkościami znanymi są R_0 i γ . Stałe a , b i n są wyznaczone w procesie wzorcowania czujnika a więc są poznane. Zmienna R_g jest znana na początku eksperymentu ale może się zmieniać ze zmianą temperatury medium.

Ze wzorów (20) i (22) wyznaczy się nieznane wielkości v i R_g . Po prostych wyliczeniach dostaje się

$$v = \left[\frac{1}{b} \left(\gamma R_0 I_0^2 \left(\frac{2I_1}{kI_0 \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} + 1 \right) - a \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (23)$$

oraz

$$R_g = R_{w0} \left(1 - \frac{1}{\frac{2I_1}{kI_0 \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} + 1} \right). \quad (24)$$

Korzystając z zależności (6) na przyrost temperatury ΔT ponad temperaturę T_g dostaje się zależność

$$\Delta T = \frac{R_{w0}}{\gamma R_0} \left(1 - \frac{1}{\frac{2I_1}{kI_0 \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} + 1} \right) - \frac{1}{\gamma}. \quad (25)$$

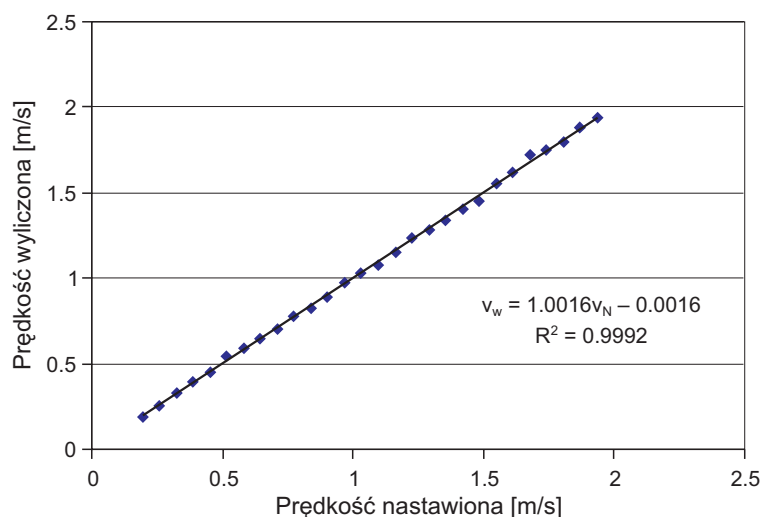
3. Badania eksperymentalne

Sondę pomiarową włączono do układu bezmostkowego anemometru stałotemperaturowego, w którym współczynnik nagrzania zadawano komputerowo [4]. Specjalny program obsługiwał zarówno anemometr (zadawanie parametrów pracy czujnika, pomiar napięć uzyskiwanych z czujnika, zapis danych na dysku i analiza fourierowska wyników) jak również stanowisko pomiarowe (zadawanie prędkości przepływu w tunelu czy ewentualny przesuw sondy).

Badania prezentowanego anemometru przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym, w którym realizowano przepływy powietrza. Czujnik umieszczono w tunelu tak, że oś osadki czujnika była w osi tunelu, a grzane włókno czujnika było ustawione pionowo i prostopadłe do prędkości. Rezystancja włókna „na zimno” wynosiła 8.94Ω , współczynnik nagrzania był równy 1.8 a amplituda modulacji sygnałem zmiennym była równa 20%. Przeprowadzono statyczne wzorcowanie czujnika w zakresie od zera do 10 m/s z krokiem 0.2 m/s. Mierzono prąd I_0 zasilania włókna dla zadanej prędkości v . W uzyskane wyniki pomiarowe wpisano równanie Kinga

$$I_0^2 = \alpha + \beta v^n \quad (26)$$

Metodą najmniejszych kwadratów otrzymano parametry równania (22): $\alpha = 1288.3 [(\text{mA})^2]$, $\beta = 1443.2 [(\text{mA})^2(\text{m/s})^{-0.404}]$, $n = 0.404$ i współczynnik korelacji $R^2 = 0.9993$. Związek pomiędzy nastawioną w eksperymencie prędkością v_N a wyliczoną z równania (22) v przedstawia rys. 2.



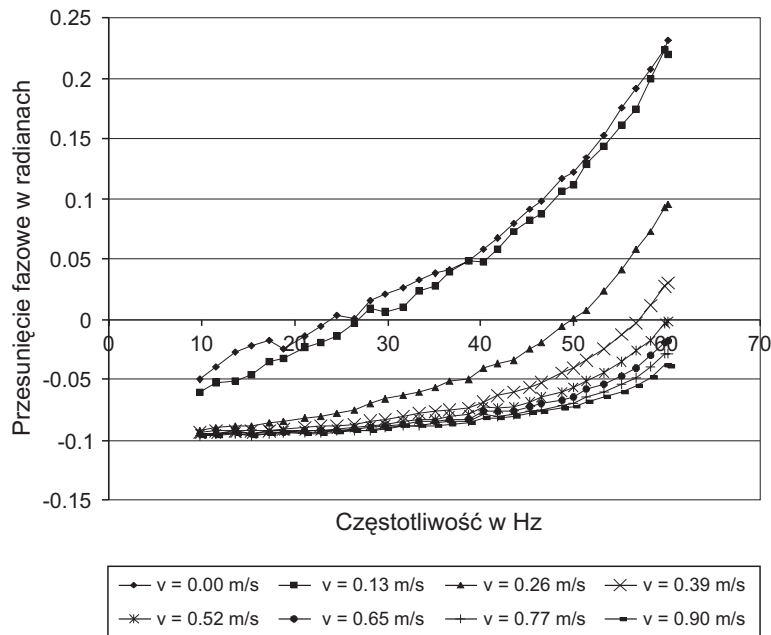
Rys. 2. Zależność prędkości wyliczonej z równania (22) od prędkości nastawionej

Widzimy, że wzór Kinga (26) dobrze aproksymuje uzyskane wyniki pomiarowe, gdyż wyliczone z pomierzonych prądów prędkości przepływu dobrze korelują z nastawionymi.

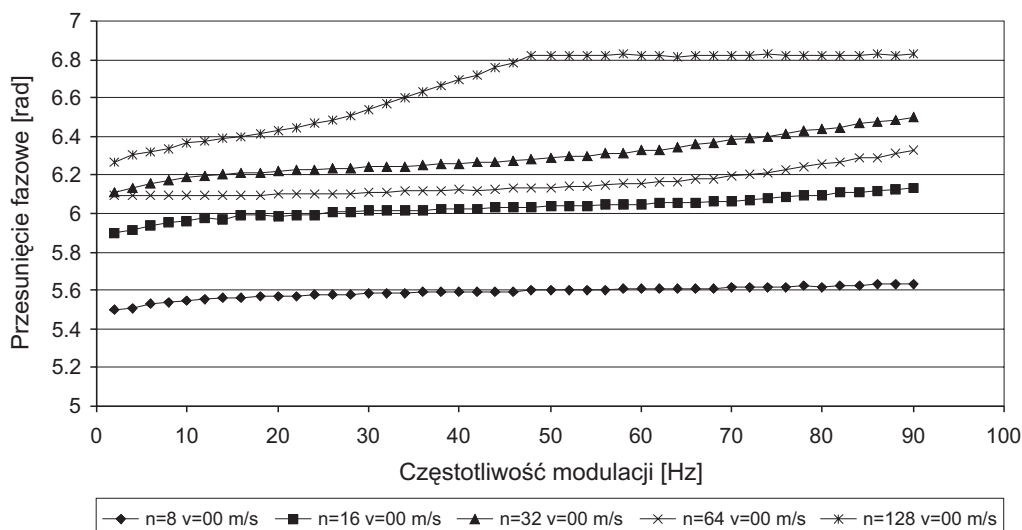
Następnie włączono modulację współczynnika nagrzania. Przeprowadzono pomiary przesunięcia fazowego φ pomiędzy pierwszą harmoniczną prądu zasilającego czujnik a sygnałem modulującym współczynnik nagrzania włókna. Zmieniano prędkości v przepływu powietrza od zera do 2.0 m/s przy stałym średnim współczynniku nagrzania równym 1.8. Częstotliwość f zmieniano od 2 Hz do 70 przy wybranych prędkościach przepływu jak w legendzie rysunku. Prezentowane wyniki pomiarowe uzyskane dla 64 ustalonych stanów w okresie ilustruje rys. 3.

Widzimy, że przesunięcie fazowe na rys.3 jest silnie nieliniową funkcją częstotliwości co jest niezgodne ze wzorem (18) gdyż przesunięcie winno być proporcjonalne do częstotliwości. Przesunięcie to zależy także od prędkości v przepływu, co przewiduje wspomniany wzór.

Następnie przebadano jaki wpływ na przesunięcie fazowe ma liczba nastawianych stanów rezystancji włókna w okresie. Rysunek 4 przedstawia zależność przesunięcia fazowego od częstotliwości modulacji dla 8, 16, 32, 64 i 128 stanów rezystancji w okresie przy zerowej prędkości przepływu.



Rys. 3. Zależność przesunięcia fazowego φ od częstotliwości dla pięciu prędkości przepływu



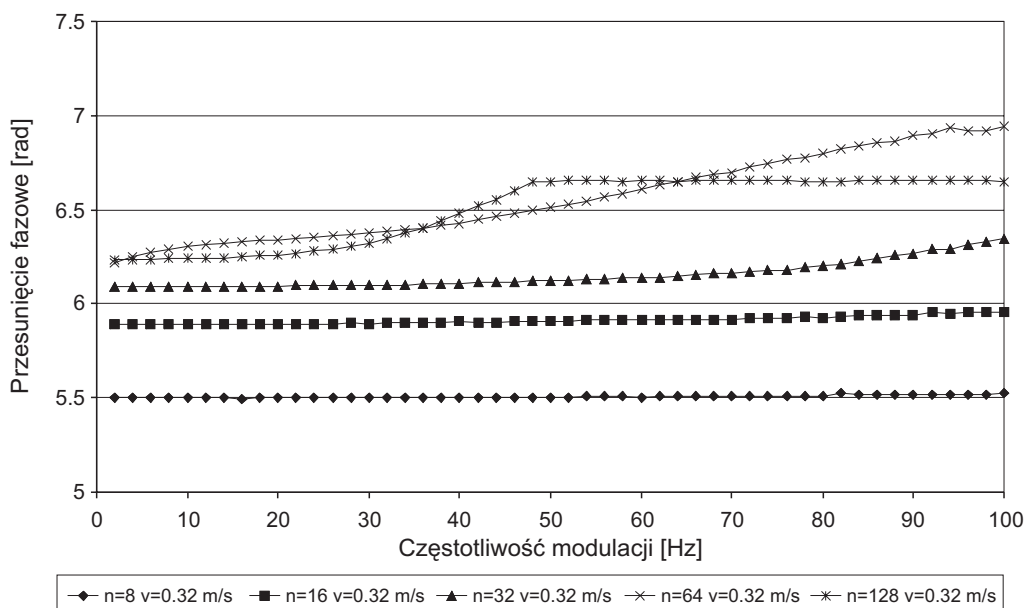
Rys. 4. Przesunięcie fazowe jako funkcja częstotliwości modulacji dla różnej liczby stanów rezystancji w okresie

Rysunki 5 do 8 przedstawiają analogiczną sytuację jak na rys. 4 tylko przy prędkości przepływu powietrza od 0.32 m/s do 1.29 m/s.

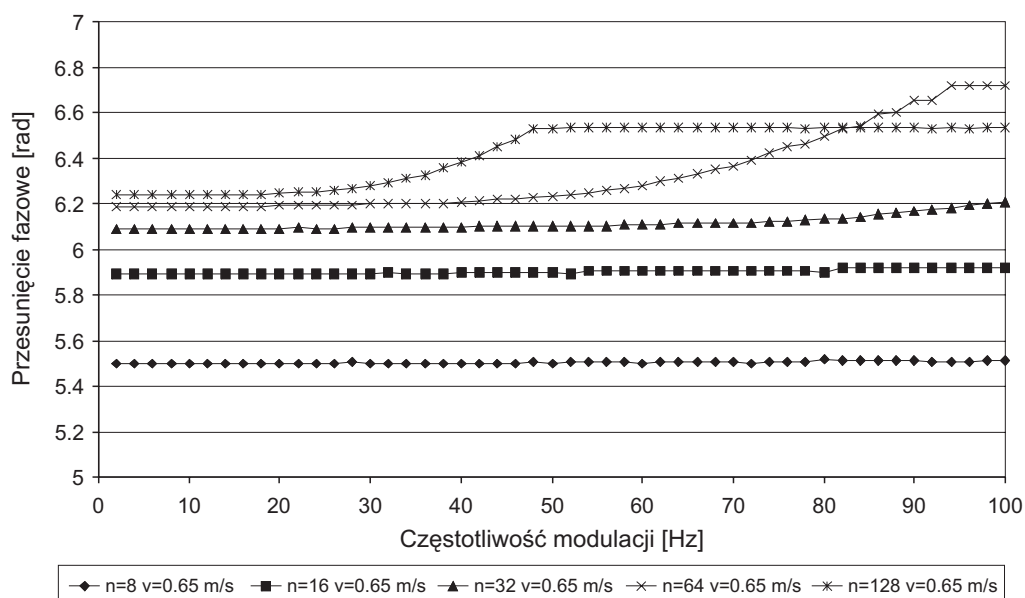
Z wykresów zamieszczonych na rys. 4-8 można zauważyć, że przesunięcie fazowe nie jest liniową funkcją częstotliwości modulacji jak to przewiduje zależność (22) ale zależy także od liczby nastawianych w programie stanów rezystancji w okresie.

Efekt ten jest prawdopodobnie wynikiem opóźnień czasowych jakie wprowadza system operacyjny Windows. W trakcie wykonywania np. generacji fali system realizuje także inne zadania wymagające czasu co prowadzi do zakłóceń częstotliwości w generacji fali. Do tego nakładają się także opóźnienia wprowadzane przez pomiarowe przetworniki analogowo-cyfrowe mierzące sygnały z anemometru. Wpływ liczby stanów w okresie na rzeczywistą częstotliwość modulacji ilustruje rys. 9.

Ponieważ pomiaru przesunięcia fazowego nie dało się poprawnie zrealizować niemożliwe było wyliczenie prędkości v i temperatury ΔT wzorami (20 i 22), gdyż zawierają zmienną φ_1 . Tak więc na posiadanym stanowisku nie można było zweryfikować eksperymentalnie przedstawionej propozycji równoczesnego

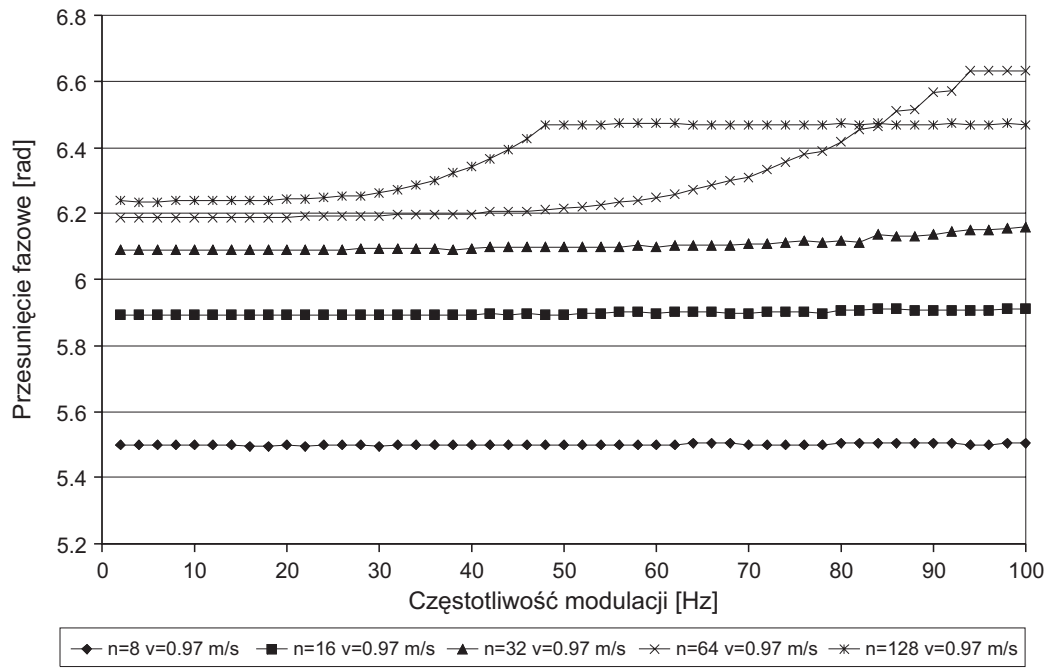


Rys. 5. Przesunięcie fazowe jako funkcja częstotliwości modulacji dla różnej liczby stanów rezystancji w okresie

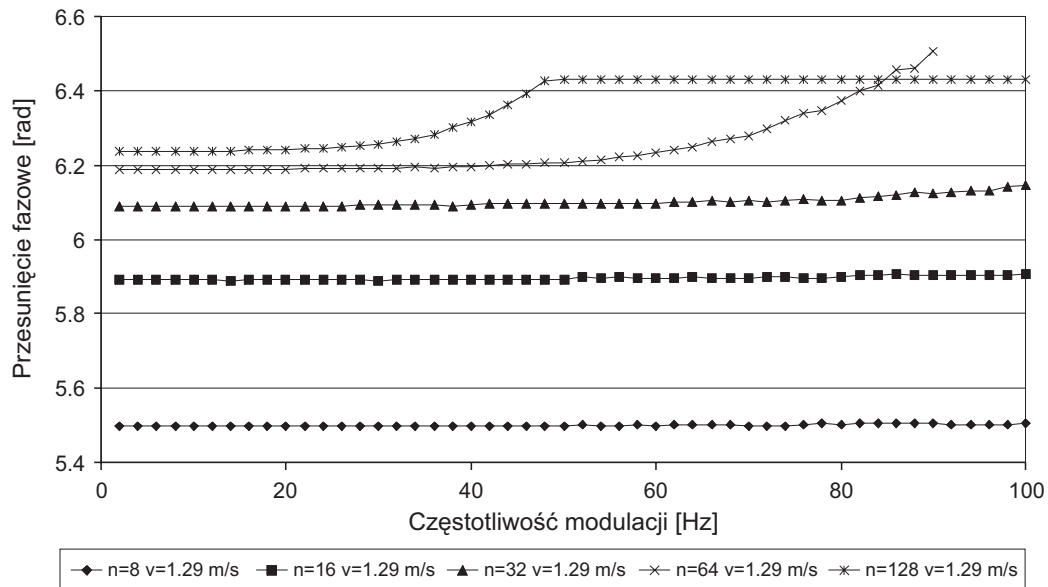


Rys. 6. Przesunięcie fazowe jako funkcja częstotliwości modulacji dla różnej liczby stanów rezystancji w okresie dla prędkości przepływu 0.65 m/s

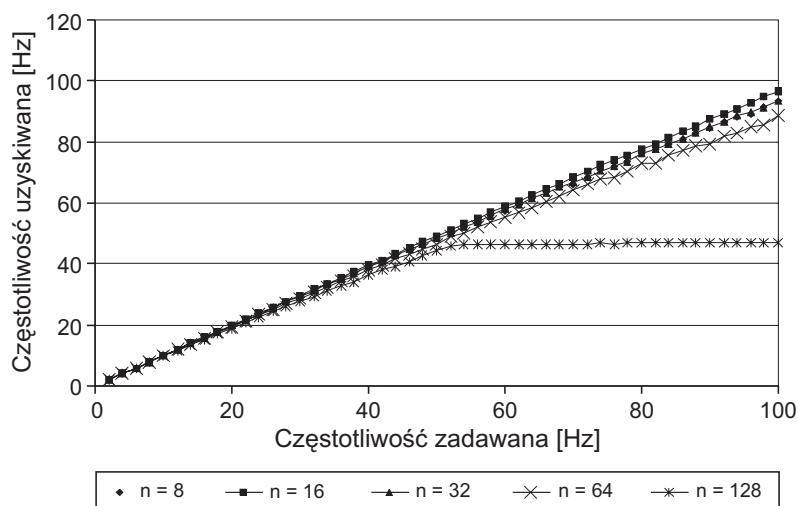
pomiaru prędkości przepływu i temperatury medium pojedynczą sondą termooanemometryczną. Musi być opracowane inne rozwiązanie generacji zmiennej rezystancji czujnika sondy. Nie świadczy to o samej metodzie pomiaru, gdyż ta była sprawdzona na analogowym rozwiązaniu [3] modulacji rezystancji włókna z pozytywnym wynikiem. Zrealizowano także układ cyfrowy, gdzie program napisany w pascalu w systemie operacyjnym DOS działał poprawnie. Wydawało się, że w systemie Windows będzie jeszcze lepiej. Ale jeszcze raz się okazało, że lepsze jest wrogiem dobrego.



Rys. 7. Przesunięcie fazowe jako funkcja częstotliwości modulacji dla różnej liczby stanów rezystancji w okresie dla prędkości przepływu 0.97 m/s



Rys. 8. Przesunięcie fazowe jako funkcja częstotliwości modulacji dla różnej liczby stanów rezystancji w okresie dla prędkości przepływu 1.29 m/s



Rys. 9. Uzyskiwana częstotliwość modulacji jako funkcja częstotliwości zadawanej dla różnej liczby nastawianych stanów rezystancji w okresie

4. Uwagi końcowe

Opisane badania powstały w trakcie realizacji tematu badawczego T01 pt. "Przepływy nieustalone w złożonych sieciach przemysłowych i przyrodniczych" realizowanego w Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie.

Literatura

- [1] King, L.V.: *On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid*, Phil. Trans. Roy. Soc. London A 214, 373-432, (1914).
- [2] Kielbasa, J.: *Sposób pomiaru prędkości przepływu płynu oraz anemometr skompensowany temperaturowo*, Patent RP nr 152363, (1991).
- [3] Ligęza, P.: *Metoda pomiaru prędkości w nieizotermicznych przepływach pojedynczą sondą termo-anemometryczną*, Praca doktorska w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN, (1993).
- [4] Ferreira, R.P.C., Freire, R.C.S., Deep, G.S., Neto, J.S.R., Oliveira A.: *Fluid Temperature Compensation In a Hot Wire Anemometer Using a Single Sensor*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Baltimore, Maryland, USA, 1-4 May 2000, (2000).
- [5] Ligęza P.: *Sterowany komputerowo wielokanałowy termooanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stalotemperaturowego*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu 2003, t. 5, nr 2, s. 237-244.
- [6] Gawor M.: *Oprogramowanie termooanemometrycznego systemu pomiaru pól prędkości przepływu gazu*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu 2003, t. 5, nr 2, s. 245-252.

Anemometer with sinusoidally modulated overheating ratio and its work in adaptive computer system

Abstract

The paper demonstrates a method for simultaneous measurements of flow velocity v and the temperature of the medium T_g by means of a single-wire probe operating in a CTA configuration where the overheating ratio $N(t)$ is modulated sinusoidally. Presented method concerns slowly changeable flows.

Due to modulation of hot-wire resistance supply voltage of wire changes. Developing the voltage into Fourier series, the relationships between the zero order component I_0 and the first order component I_1 of the voltage across

the hot wire and the flow velocity v and medium temperature T_g can be found. Thus obtained two nonlinear algebraic equations allow for simple computation of flow velocity v and medium temperature T_g .

This method is developed from the earlier where the temperature of the wire was modulated stepwise. This manner of modulation caused transitory overheating of the wire and led to errors of the velocity and temperature calculations.

Keywords: hot-wire probe

Recenzował: prof. dr hab. *Stanisław Gumuła*, Akademia Górniczo-Hutnicza