

Pseudosymultaniczny pomiar prędkości i temperatury w przepływach nieustalonych

PAWEŁ LIGEZA

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

Streszczenie

Pomiary termooanemometryczne w przepływach nieizotermicznych wymagają zastosowania układu kompensacji lub korekcji temperaturowej. Jednym z rozwiązań jest termooanemometr dwustanowy, pracujący z cyklicznie zmieniającym się w czasie poziomem nagrzania pojedynczego czujnika. Układ ten pozwala na prowadzenie pseudosymultanicznych pomiarów prędkości i temperatury w przepływach nieustalonych. Obszar pomiarowy ograniczony jest do rozmiarów elementu czynnego czujnika. Układ przeznaczony jest do badania przepływów z dużym gradientem prędkości i temperatury. Pasma przenoszenia jest jednak znacznie ograniczone. W pracy zaproponowano metodę optymalizacji pasma przenoszenia termooanemometru dwustanowego opartą o dwa elementy. Metoda polega na zastosowaniu specjalizowanego układu stałotemperaturowego o zmiennych parametrach dynamicznych oraz na odpowiedniej organizacji cyklu pomiarowego. Analizę metody przeprowadzono w oparciu o symulacyjne badania modelowe. W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że istnieje możliwość znacznego poszerzenia pasma przenoszenia termooanemometru dwustanowego.

Słowa kluczowe: termooanemometria, korekcja temperaturowa, pasmo przenoszenia, symulacja komputerowa, optymalizacja

1. Wprowadzenie

Pomiary termooanemometryczne w przepływach nieizotermicznych wymagają zastosowania układu kompensacji lub korekcji temperaturowej. Jednym z ciekawych rozwiązań jest termooanemometr dwustanowy, pracujący z cyklicznie zmieniającym się w czasie poziomem nagrzania pojedynczego czujnika pomiarowego [1, 2, 3]. Na podstawie pomiaru sygnału wyjściowego z układu w stanach ustalonych dla obu poziomów nagrzania wyznaczana jest prędkość przepływu oraz dodatkowo temperatura płynu. Termooanemometr musi posiadać możliwość zmiany poziomu nagrzania czujnika termooanemometrycznego. Ważną zaletą układu jest to, że obszar pomiarowy, w którym dokonywany jest pomiar prędkości i temperatury ograniczony jest do rozmiarów elementu czynnego pojedynczego czujnika termooanemometrycznego. Układ doskonale nadaje się do badania przepływów z dużym gradientem prędkości i temperatury. Typowym zastosowaniem jest badanie rozkładu prędkości i temperatury w wymiennikach ciepła, przy opływie silnie nagrzanych elementów, oraz w układach nagrzewania i chłodzenia. Układ posiada jednak znacznie ograniczone pasmo przenoszonych częstotliwości. Ponieważ termooanemometr dwustanowy stanowi unikatowe narzędzie pomiarowe o szerokim obszarze aplikacyjnym, celowa jest optymalizacja pasma przenoszenia tego układu.

Pasma przenoszenia termooanemometru dwustanowego uzależnione jest od czasu ustalania się sygnału po przełączeniu poziomu nagrzania czujnika. Czas ten determinuje maksymalną częstotliwość przełączania poziomów nagrzania czujnika i obliczania parametrów przepływu. W dotychczasowych rozwiązaniach [2] stosowano klasyczny układ stałotemperaturowy o stałych parametrach dynamicznych. W układzie takim czas osiągnięcia stanu ustalonego po zmianie poziomu nagrzania czujnika jest silnie uzależniony od prędkości przepływu i aktualnego nagrzania. W praktyce optymalizacja procesu przełączania poprzez regulację układu możliwa jest tylko dla jednej wartości prędkości. Przy innych prędkościach czasy ustalania się sygnału nie są optymalne. W konsekwencji stosowano dotychczas przełączanie poziomu nagrzania ze stałą, niewielką

częstotliwością, od pojedynczych herców do maksymalnie setek herców [2, 3]. Częstotliwość ta była tak dobrana, aby w pełnym zakresie prędkości uzyskać stan ustalony.

Autor niniejszej pracy proponuje optymalizację pasma przenoszenia termooanemometru dwustanowego opartą o dwa elementy. Optymalizacja ta polega na zastosowaniu specjalizowanego układu stałotemperaturowego o zmiennych parametrach dynamicznych oraz na odpowiedniej organizacji cyklu pomiarowego.

W proponowanym rozwiązaniu układ stałotemperaturowy posiada możliwość zadawania poziomu nagrzania czujnika oraz dodatkowo możliwa jest regulacja właściwości dynamicznych układu. Bezpośrednio przed przełączeniem poziomu nagrzania właściwości dynamiczne układu stałotemperaturowego ustawiane są tak, aby dla danych warunków uzyskać minimalny czas osiągnięcia stanu ustalonego. Regulacja ta następuje na podstawie poprzednio obliczonej prędkości oraz wartości zadawanego poziomu nagrzania.

Natomiast organizacja cyklu pomiarowego przebiega zgodnie z następującym algorytmem:

- po przełączeniu poziomu nagrzania wyznaczana jest prędkość i temperatura płynu na podstawie wartości prądu czujnika z dwóch poprzednich stanów ustalonych,
- następnie dokonywana jest seria pomiarów prądu czujnika aż do momentu osiągnięcia stanu ustalonego zgodnie z przyjętym kryterium,
- w kolejnym kroku na podstawie poprzednio obliczonej prędkości oraz wartości zadawanego poziomu nagrzania ustawiane są optymalne właściwości dynamiczne układu stałotemperaturowego,
- po czym następuje zadanie kolejnego poziomu nagrzania czujnika i cykl się powtarza.

Zaproponowana struktura układu i organizacja cyklu pomiarowego pozwala na uzyskanie maksymalnej częstotliwości przełączania poziomu nagrzania. Poza optymalizacją pasma przenoszenia układu uzyskuje się tu także minimalizację błędów pomiarowych.

Test proponowanego rozwiązania optymalizacji pasma przenoszenia termooanemometru dwustanowego przeprowadzono w oparciu o badania modelowe. Badania takie pozwalają na symulację pracy układu pomiarowego dla szerokiego zakresu parametrów i różnych trybów pracy.

2. Metoda pomiarowa termooanemometru dwustanowego

Termooanemometr dwustanowy umożliwia pomiar prędkości i temperatury w nieizotermicznym przepływie płynu przy zastosowaniu pojedynczego czujnika pomiarowego. Czujnik ten współpracuje ze sterowanym układem anemometru stałotemperaturowego. Temperatura elementu czynnego czujnika przełączana jest cyklicznie w czasie pomiędzy dwoma zadanymi poziomami nagrzania. Temperatura ta musi być znacząco wyższa od maksymalnej temperatury płynu. Po każdym przełączeniu w stanie ustalonym mierzony jest prąd czujnika. Na podstawie wyników pomiaru prądu w bieżącym i poprzednim cyklu wyznaczana jest prędkość przepływu i temperatura płynu. Metoda ta w znacznym stopniu redukuje wpływ temperatury płynu na wynik pomiaru prędkości. Do opisu algorytmu pomiarowego termooanemometru dwustanowego przyjmujemy liniową zależność rezystancji elementu czynnego czujnika od jego temperatury:

$$R = R_0(1 + \alpha_0(T - T_0)) \quad (1)$$

gdzie:

R – rezystancja czujnika w temperaturze T ,

R_0 – rezystancja czujnika w temperaturze odniesienia T_0 ,

α_0 – temperaturowy współczynnik rezystancji materiału czujnika w temperaturze odniesienia.

Dla opisu metody model czujnika termooanemometrycznego przyjmujemy w postaci [4]:

$$I^2 R = I_L^2 (R - R_G) \left[1 + \left(\frac{V}{V_L} \right)^n \right] + I_L^2 \tau_L \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

gdzie:

I – prąd czujnika,

R_G – rezystancja czujnika w temperaturze płynu T_G ,

V – prędkość przepływu płynu,

I_L, V_L, τ_L, n – parametry modelu,

t – czas.

Dodatkowo wprowadzamy współczynniki nagrzania czujnika względem temperatury odniesienia:

$$\eta = \frac{R}{R_0} \quad (3)$$

$$\eta_G = \frac{R_G}{R_0} \quad (4)$$

Zakładamy, że prędkość i temperatura płynu pomiędzy kolejnymi przełączeniami cyklu pomiarowego nie zmieniają się w sposób istotny. Dodatkowo zakładamy, że wykładnik n w modelu czujnika jest stały. W obu fazach cyklu pomiarowego, w stanie ustalonym czujnik opisany jest układem równań:

$$I_i^2 \eta_i = I_{Li}^2 (\eta_i - \eta_G) \left[1 + \left(\frac{V}{V_{Li}} \right)^n \right], \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

Z układu równań (5) możemy wyznaczyć mierzoną prędkość przepływu v oraz współczynnik nagrzania η_G , a następnie mierzoną temperaturę płynu z zależności:

$$\theta_G = T_0 + \frac{\eta_G - 1}{\alpha_0} \quad (6)$$

W ogólnym przypadku rozwiązanie układu równań (5) ma postać:

$$v = \left(\frac{1}{2(\eta_2 - \eta_1)} \left(\frac{I_2^2 \eta_2 V_{L2}^n}{I_{L2}^2} - \frac{I_1^2 \eta_1 V_{L1}^n}{I_{L1}^2} - (\eta_2 - \eta_1)(V_{L2}^n + V_{L1}^n) + \right. \right. \quad (7)$$

$$\left. \left. + \sqrt{\left(\frac{I_2^2 \eta_2 V_{L2}^n}{I_{L2}^2} - \frac{I_1^2 \eta_1 V_{L1}^n}{I_{L1}^2} \right)^2 - 2(\eta_2 - \eta_1)(V_{L2}^n - V_{L1}^n) \left(\frac{I_2^2 \eta_2 V_{L2}^n}{I_{L2}^2} + \frac{I_1^2 \eta_1 V_{L1}^n}{I_{L1}^2} \right) + (\eta_2 - \eta_1)^2 (V_{L2}^n - V_{L1}^n)^2} \right) \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\eta_G = \frac{1}{2(V_{L2}^n - V_{L1}^n)} \left(-\frac{I_2^2 \eta_2 V_{L2}^n}{I_{L2}^2} + \frac{I_1^2 \eta_1 V_{L1}^n}{I_{L1}^2} + (\eta_1 + \eta_2)(V_{L2}^n - V_{L1}^n) + \right. \quad (8)$$

$$\left. + \sqrt{\left(\frac{I_2^2 \eta_2 V_{L2}^n}{I_{L2}^2} - \frac{I_1^2 \eta_1 V_{L1}^n}{I_{L1}^2} \right)^2 - 2(V_{L2}^n - V_{L1}^n)(\eta_2 - \eta_1) \left(\frac{I_2^2 \eta_2 V_{L2}^n}{I_{L2}^2} + \frac{I_1^2 \eta_1 V_{L1}^n}{I_{L1}^2} \right) + (V_{L2}^n - V_{L1}^n)^2 (\eta_2 - \eta_1)^2} \right)$$

przy czym warunkiem istnienia rzeczywistego rozwiązania jest niezerowa wartość wyrażeń w mianownikach i nieujemna wartość funkcji podpierwiastkowych.

Natomiast przy dodatkowym założeniu, że parametry modelu czujnika są niezależne od poziomu nagrzania:

$$I_{Li} = I_L, \quad V_{Li} = V_L, \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

rozwiązanie przyjmuje uproszczoną postać:

$$v = \left(\frac{I_2^2 \eta_2 - I_1^2 \eta_1}{I_L^2 (\eta_2 - \eta_1)} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} V_L \quad (10)$$

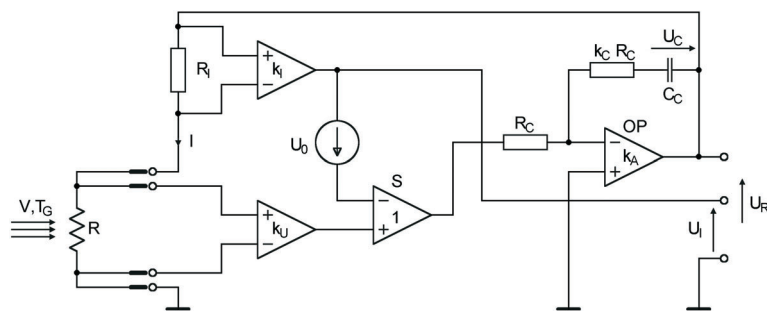
$$\eta_G = \eta_1 \eta_2 \frac{I_2^2 - I_1^2}{I_2^2 \eta_2 - I_1^2 \eta_1} \quad (11)$$

Otrzymane zależności ogólne (6), (7), (8) lub uproszczone (6), (10), (11) pozwalają na wyznaczenie prędkości przepływu i temperatury płynu w metodzie termoanemometru dwustanowego. Zależności ogólne

pozwalają na uzyskanie większej dokładności pomiaru, jednak wymagają dłuższego czasu potrzebnego na wykonanie obliczeń.

3. Dynamiczny model układu pomiarowego

W celu przeprowadzenia badań modelowych i optymalizacyjnych opracowano dynamiczny model matematyczny układu pomiarowego. Do realizacji termooanemometru dwustanowego zastosowano bezmostkowy układ stałotemperaturowego z czteropunktowym pomiarem rezystancji czujnika. Układ ten pozwala na eliminację wpływu rezystancji doprowadzeń czujnika na współczynnik nagrzania. Zastosowanie tego układu wynika z potrzeby precyzyjnego zadawania i utrzymywania współczynnika nagrzania czujnika pomiarowego. Jest to istotne dla minimalizacji błędów pomiarowych. Możliwe jest tu także zastosowanie klasycznego mostka stałotemperaturowego. Uproszczony schemat ideowy układu pomiarowego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat ideowy układu pomiarowego

Idea działania układu jest następująca. Napięcie na elemencie czynnym czujnika R jest wzmacniane we wzmacniaczu różnicowym k_U . Napięcie proporcjonalne do prądu czujnika na rezystorze R_I jest wzmacniane we wzmacniaczu różnicowym k_I . Napięcia wyjściowe z tych wzmacniaczy są porównywane w wzmacniaczu różnicowym S o wzmacnieniu równym jeden. Napięcie błędne z wyjścia wzmacniacza S steruje pracą regulatora proporcjonalno – całkującego zbudowanego na wzmacniaczu operacyjnym OP . Regulator zasila czujnik takim napięciem U_R , aby poprzez nagrzanie czujnika sprowadzać napięcie błędne do zera. Pozwala to na utrzymanie rezystancji czujnika na zadanym poziomie. Sygnałem wyjściowym z układu jest napięcie U_I proporcjonalne do prądu czujnika. Źródło napięcia niezrównoważenia U_0 zapewnia poprawny start układu po włączeniu zasilania oraz wpływa na statyczne i dynamiczne właściwości układu.

W badaniach modelowych parametry przepływu i układu mogą zmieniać się w szerokim zakresie, zaproponowano więc nieliniowy model układu pomiarowego w dziedzinie czasu. Model matematyczny układu pomiarowego z rysunku 1 opracowano w oparciu o równania opisujące jego elementy składowe. Oznaczenia przyjęto zgodnie z przedstawionymi na rysunku 1. Przy konstruowaniu modelu przyjęto następujące założenia:

- rezystancja czujnika jest liniową funkcją jego temperatury zgodnie z (1),
- czujnik termooanemometryczny opisany jest modelem pierwszego rzędu (2),
- nie uwzględnia się impedancji pasożytniczych,
- wzmacniacz operacyjny regulatora opisuje model inercyjny pierwszego rzędu uwzględniający rezystancję wejściową R_A , wzmacnienie k_A oraz stałą czasową τ_A ,
- wzmacniacze różnicowe mają dużą rezystancję wejściową i są bezinercyjne,
- wzmacnienia k_U oraz k_C mogą być regulowane zewnętrznym sygnałem sterującym,
- w układzie nie występują ograniczenia zakresu zmienności sygnałów oraz efekty nieliniowe związane z nasyceniami w elementach elektronicznych.

Stałą czasową regulatora proporcjonalno-całkującego oznaczono przez:

$$\tau_C = k_C R_C C_C \quad (12)$$

Uwzględniając powyższe zależności, przyjmując jako zmienne stanu do opisu układu napięcia U_R i U_C oraz rezystancję czujnika R , z analizy układu przedstawionego na rysunku 1 otrzymujemy układ równań opisujący układ pomiarowy w postaci:

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{-(R_C/R_A + 1)U_C + (R_C/R_A + 1 - (k_U R - k_I R_I)/(R + R_I))U_R + U_0}{\tau_C(R_C/R_A + 1 + 1/k_C)} \quad (13)$$

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{(1/k_C)U_C - ((1/k_A + 1)/k_C + R_C/(k_A R_A) + 1/k_A - (k_U R - k_I R_I)/(R + R_I))U_R + U_0}{\tau_A[R_C/(k_A R_A) + 1/k_A + 1/(k_A k_C)]} \quad (14)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{U_R^2 R / [I_L^2 (R + R_I)^2] - (R - R_G)[1 + (V/V_L)^n]}{\tau_L} \quad (15)$$

Można zauważyć, że w stanie ustalonym, dla dużej wartości wzmocnienia k_A i napięcia U_0 bliskiego zera równania (13) i (14) prowadzą do przybliżonej zależności:

$$R = R_I \frac{k_I}{k_U} \quad (16)$$

Tak więc dla odpowiednio dużych wzmocnień wzmacniacza użytego w regulatorze i dla niewielkich napięć niezrównoważenia ustalona rezystancja czujnika jest funkcją ilorazu wzmocnień k_I i k_U . W analizowanym układzie poziom nagrzania będzie zadawany poprzez ustawienie odpowiedniej wartości wzmocnienia k_U . Natomiast właściwości dynamiczne układu będą zadawane poprzez ustawianie wzmocnienia regulatora k_C [4, 5].

Jako równanie wyjścia dla modelu układu pomiarowego przyjęto zależność prądu czujnika od zmiennych stanu:

$$I = \frac{U_R}{R + R_I} \quad (17)$$

Równania (13), (14), (15) i (17) z warunkami początkowymi dla zmiennych stanu przyjmujemy jako model matematyczny układu pomiarowego, stanowiący podstawę do prowadzenia badań modelowych. Model ten wraz z zależnościami (6), (7), (8) lub (6), (10), (11) pozwoli na prowadzenie badań symulacyjnych pomiaru prędkości przepływu i temperatury płynu w metodzie termooanemometru dwustanowego.

4. Metodyka i wyniki badań modelowych

Celem badań modelowych jest analiza dynamiki procesu przełączania nagrzania czujnika termooanemometru dwustanowego oraz minimalizacja czasu trwania cyklu pomiarowego. Badania modelowe prowadzono dla układu pomiarowego, w którym wzmocnienie regulatora jest funkcją prędkości przepływu i zadanego współczynnika nagrzania. Dla porównania modelowano również klasyczny układ z regulatorem o stałych parametrach. Badania przeprowadzono metodą wielokrotnego rozwiązywania układu równań stanowiącego model termooanemometru. Proces taki stanowi symulację pracy układu. Wykorzystano tu środowisko MATLAB. Do rozwiązywania układu równań różniczkowych zastosowano metodę Rungego-Kutty piątego rzędu. Przebieg symulacji polegał na wyznaczeniu stanu ustalonego dla danego zbioru parametrów przepływu i układu pomiarowego, a następnie wyznaczeniu odpowiedzi układu po przełączeniu nagrzania czujnika na poziom wyższy i ponownie na niższy. Po każdym przełączeniu wyznaczano czas ustalania się prądu czujnika na zadanym poziomie. Z wartości ustalonej prądu w obu stanach obliczano mierzoną prędkość przepływu.

Badania prowadzono dla modelu czujnika pomiarowego z włóknem wolframowym o średnicy trzech mikrometrów. W badaniach jako płyn przyjęto powietrze o temperaturze $T_G = 293$ K. Do obliczeń przyjęto parametry czujnika i układu pomiarowego o wartościach zgodnych ze stosowanymi w układach rzeczywistych. Wartości tych parametrów zestawiono w tabelach 1 i 2.

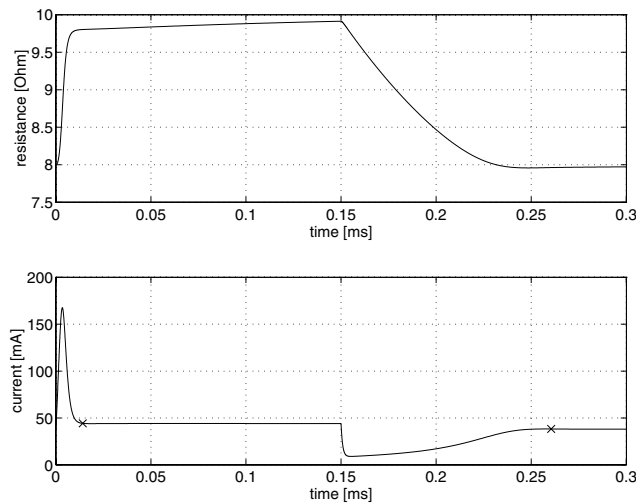
Tab. 1. Parametry modelu czujnika pomiarowego

R_0	T_0	α_0	I_L	V_L	τ_L	n
[Ω]	[K]	[1/K]	[A]	[m/s]	[s]	
5	293	3.33×10^{-3}	42×10^{-3}	7.7	0.28×10^{-3}	0.5

Tab. 2. Parametry modelu układu pomiarowego

R_I	k_I	η_1	η_2	U_0	R_A	k_A	τ_A	R_C	τ_C
[Ω]				[V]	[Ω]		[s]	[Ω]	[s]
10	1	1.6	2.0	1×10^{-6}	1×10^6	1×10^6	0.1	100	150×10^{-6}

W pierwszym etapie badań wyznaczono optymalne wartości wzmocnień k_C regulatora układu dla kolejnych zadawanych prędkości przepływu. Przez wartości optymalne rozumiano wartości, dla których uzyskano minimalny czas ustalania się wartości prądu z błędem mniejszym od założonej wartości 0.2 mA. Oddzielnie dobierano wzmocnienie k_{CH} przy przełączaniu nagrzania na poziom wyższy, a oddzielnie wzmocnienie k_{CL} przy przełączaniu na niższy poziom. Przebieg odpowiedzi układu dla pojedynczej symulacji przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Odpowiedź układu pomiarowego dla pojedynczej symulacji

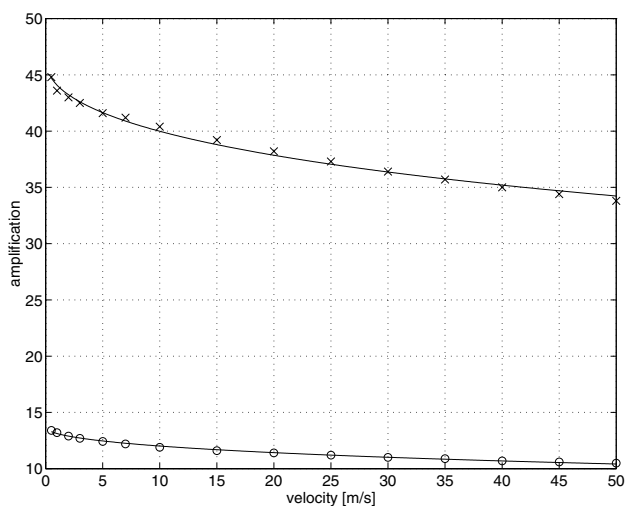
Na wykresie przedstawiono zmienność rezystancji oraz prądu czujnika w czasie cyklu pomiarowego. Na przebiegu punkty ustalenia się wartości prądu zaznaczono znakiem „x”. Przebieg z rysunku 2. uzyskano dla zadanej prędkości przepływu $V = 10$ m/s oraz dobranych optymalnych wartości wzmocnień regulatora. Można zauważyć, że podczas nagrzewania czujnika ustalenie się wartości prądu następuje przed osiągnięciem zadanej rezystancji. Czujnik nagrzewany jest krótkim impulsem prądu o dużej amplitudzie, po czym prąd ustala się. Natomiast w procesie chłodzenia czujnika następuje szybkie obniżenie wartości prądu, a następnie wolne dochodzenie do stanu ustalonego.

Wyznaczone optymalne wartości wzmocnień k_C regulatora układu pomiarowego w funkcji prędkości przepływu przedstawiono na rysunku 3. Przebieg optymalnych wartości wzmocnienia k_{CH} oznaczono znakami „o”, a optymalnych wzmocnień k_{CL} znakami „x”.

Do uzyskanych wartości dopasowano metodą najmniejszych kwadratów funkcję analityczną postaci:

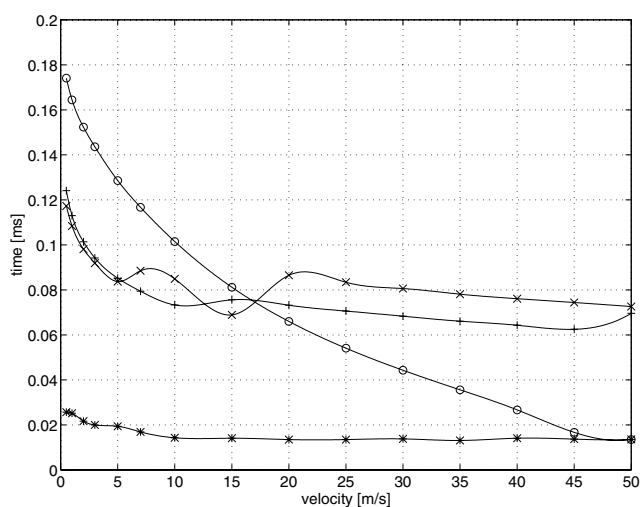
$$k_C = \frac{k_{C0}}{\sqrt{1 + \frac{V}{V_{C0}}}} \quad (18)$$

Postać tej funkcji dobrano eksperymentalnie w taki sposób, aby uzyskać dobre dopasowanie przy prostej postaci funkcji i niewielkiej ilości parametrów. Parametry funkcji (18) wynoszą $k_{C0} = 13.71$, $V_{C0} = 500.3$ dla wzmocnienia k_{CH} , oraz $k_{C0} = 46.28$, $V_{C0} = 403,8$ dla wzmocnienia k_{CL} . Dopasowane przebiegi przed-

Rys. 3. Optymalne wartości wzmocnień k_C regulatora układu pomiarowego

stawiono na rysunku 3. linią ciągłą. Funkcja (18) może zostać wykorzystana w algorytmie pomiarowym rzeczywistego anemometru dwustanowego do minimalizacji czasu trwania cyklu pomiarowego.

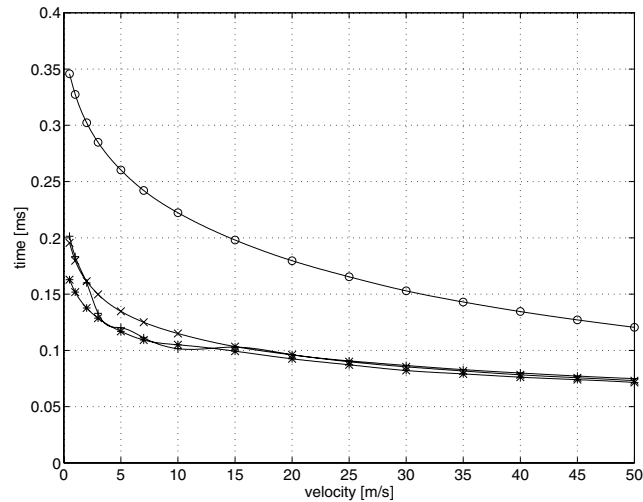
Uzyskane wartości czasu ustalania się prądu w funkcji prędkości przepływu dla przełączenia na wyższy poziom nagrzania przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Czasy ustalania się prądu dla przełączenia na wyższy poziom nagrzania

Znakami „*” zaznaczono przebieg dla optymalnie dobranych wartości wzmocnienia regulatora z rysunku 3. Dla porównania wyznaczono także przebiegi dla stałych w cyklu pomiarowym wartości wzmocnienia regulatora. Przyjęto trzy wartości wzmocnienia: wartość minimalną i maksymalną ze zbioru wartości optymalnych oraz wartość pośrednią, optymalną dla prędkości 10 m/s. Przebiegi oznaczono odpowiednio: znakami „o” dla minimalnego $k_C = 10.5$, znakami „+” dla pośredniego $k_C = 39.5$, a znakami „x” dla maksymalnego $k_C = 44.8$. Z analizy przebiegów z rysunku 4. wynika, że uzależnienie wzmocnienia regulatora od prędkości pozwala na znaczną redukcję czasu ustalania się przebiegu prądu w procesie nagrzewania czujnika. Uzyskano skrócenia czasu nagrzewania do poziomu około 20% czasu dla stałego wzmocnienia regulatora. Dla wzmocnienia minimalnego czas nagrzewania bardzo silnie zależy od prędkości przepływu. Natomiast przebiegi dla wzmocnienia pośredniego i maksymalnego są zbliżone. Zafalowania przebiegu dla wzmocnienia maksymalnego są związane z nieliniowym charakterem układu pomiarowego.

Czasu ustalania się prądu w funkcji prędkości przepływu dla przełączenia na niższy poziom nagrzania przedstawia rysunek 5.

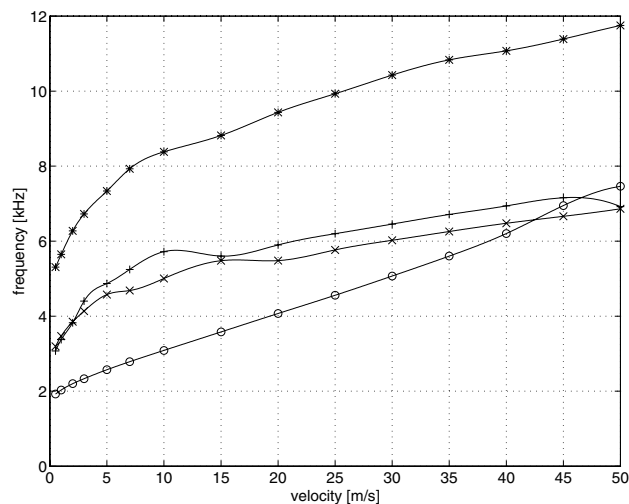


Rys. 5. Czasy ustalania się prądu dla przełączenia na niższy poziom nagrzania

Podobnie jak poprzednio, znakami „*” zaznaczono przebieg dla optymalnych wartości wzmocnienia regulatora, znakami „o” dla $k_C = 10.5$, znakami „+” dla $k_C = 39.5$ oraz znakami „x” dla $k_C = 44.8$. Z rysunku 5. widać, że uzależnienie wzmocnienia regulatora od prędkości w przypadku procesu chłodzenia pozwala tylko na nieznaczną redukcję czasu ustalania się przebiegu. W zakresie małych prędkości uzyskano skrócenia czasu ustalania do poziomu około 80% czasu dla stałego wzmocnienia regulatora. Przebiegi dla wzmocnienia pośredniego i maksymalnego są zbliżone do przebiegów dla wzmocnienia optymalnego. Dla wzmocnienia minimalnego czas chłodzenia bardzo silnie zależy od prędkości przepływu i jest znacząco wydłużony w porównaniu z pozostałymi przypadkami.

Na podstawie wyznaczonych czasów nagrzewania i chłodzenia czujnika obliczono częstotliwości pełnego cyklu pomiarowego. Uzyskane wartości w funkcji prędkości przepływu przedstawiono na rysunku 6.

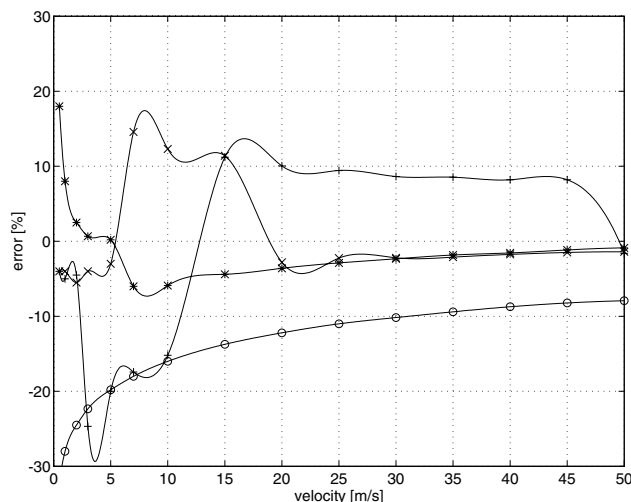
Znakami „*” zaznaczono przebieg dla optymalnych wartości wzmocnienia regulatora, znakami „o” dla $k_C = 10.5$, znakami „+” dla $k_C = 39.5$, a znakami „x” dla $k_C = 44.8$. Z przedstawionych na rys. 6. wykresów wynika, że uzależnienie wzmocnienia regulatora od prędkości pozwala na około dwukrotne zwiększenie częstotliwości cyklu pomiarowego w stosunku do układu z regulatorem stałym. Wiąże się to z podwojeniem pasma przenoszenia układu pomiarowego oraz z dwukrotną redukcją czasu pomiaru. W każdym cyklu pomiarowym obliczenia wartości mierzonych wykonywane są dwukrotnie, po przełączeniu poziomem nagrzania. Tak więc rzeczywista częstotliwość wyznaczania wartości mierzonych jest dwukrotnie większa od przedstawionych na rysunku 6. Ponadto z rysunku 6. wynika, że w przypadku zastosowania regulatora stałego



Rys. 6. Częstotliwości pełnego cyklu pomiarowego

korzystne jest dobranie wzmocnienia o odpowiednio dużej wartości. Wzmocnienie dla danych warunków pomiarowych powinno być dobrana optymalnie dla minimalizacji czasu trwania cyklu pomiarowego.

We wszystkich przedstawionych symulacjach procesu pomiarowego wyznaczano zgodnie z algorytmem pomiarowym termooanemometru dwustanowego wartość mierzonej prędkości przepływu. Następnie obliczono błędy względne pomiarów, a wyniki przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Błąd względny pomiaru prędkości w badaniach symulacyjnych

Znakami „*” zaznaczono przebieg błędu względnego w funkcji zadanej prędkości przepływu dla optymalnych wartości wzmocnienia regulatora, znakami „o” dla $k_C = 10.5$, znakami „+” dla $k_C = 39.5$, a znakami „x” dla $k_C = 44.8$. Dla porównania uzyskanych wyników obliczono wartość średnią dla wartości bezwzględnej błędu oraz odchylenie standardowe. Uzyskane wyniki zawiera tabela 3.

Tab. 3. Parametry rozkładu błędów względnych pomiaru prędkości

	Wzmocnienie regulatora			
	optymalne zmienne	minimalne stałe	pośrednie stałe	maksymalne stałe
Średni błąd względny [%]	2.90	12.55	10.11	4.56
Odchylenie standardowe [%]	2.65	4.69	11.02	6.18

W przeprowadzonych symulacjach źródłem błędów pomiaru prędkości jest błąd pomiaru stanu ustalonego prądu czujnika. Ze względu na nieliniowość układu pomiarowego błędy te charakteryzuje duży rozrzut. Z danych przedstawionych w tabeli 3. wynika, że najlepsze rezultaty uzyskano dla regulatora ze wzmocnieniem optymalnym, zależnym od prędkości przepływu i poziomu nagrzania czujnika. W pozostałych przypadkach błąd średni i odchylenie standardowe mają znacznie większe wartości. Wynika to z faktu, że w przypadku regulatora ze wzmocnieniem optymalnym pochodna prądu czujnika po czasie przy dążeniu do stanu ustalonego posiada wartości mniejsze, niż w pozostałych przypadkach. Błąd pomiaru prądu czujnika jest więc najmniejszy. Jest to dodatkowa zaleta przedstawionego rozwiązania.

5. Wnioski

W pracy zaproponowano metodę optymalizacji pasma przenoszenia termooanemometru dwustanowego opartą o dwa elementy. Metoda polega na zastosowaniu specjalizowanego układu stałotemperaturowego o zmiennych parametrach dynamicznych oraz na odpowiedniej organizacji cyklu pomiarowego. Analizę metody przeprowadzono w oparciu o symulacyjne badania modelowe. W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że istnieje możliwość znacznego poszerzenia pasma przenoszenia termooanemometru dwustanowego. Uzależnienie wzmocnienia regulatora od prędkości przepływu i poziomu nagrzania pozwala na uzyskanie w badanym przypadku maksymalnej częstotliwości cyklu pomiarowego na poziomie 5 do 12 kHz.

Jest to dwukrotnie więcej, niż dla modelowanego regulatora o stałych parametrach i aż o rząd wielkości więcej niż maksymalne częstotliwości stosowane w układach rzeczywistych. Jest to zapewne związane z faktem, iż układ pomiarowy i organizacja cyklu nie były optymalizowane. W takim samym stosunku jak częstotliwość cyklu pomiarowego poszerzane jest pasmo przenoszenia układu.

Uzależnienie wzmocnienia regulatora od prędkości przepływu pozwala w szczególności na optymalizację procesu nagrzewania czujnika. Przy nagrzewaniu czujnika należy również zadbać, aby układ elektroniczny pozwalał na uzyskanie prądu czujnika o odpowiednio dużej wartości maksymalnej. W przypadku regulatora o wzmocnieniu stałym niewielka wartość wzmocnienia optymalna dla nagrzewania w zakresie dużych prędkości powoduje znaczne wydłużenie procesie chłodzenia.

Przedstawione rozwiązanie pozwala również na minimalizację błędów pomiarowych. Założeniem metody jest, że prędkość i temperatura płynu pomiędzy kolejnymi przełączeniami cyklu pomiarowego nie zmieniają się w sposób istotny. Zwiększenie częstotliwości przełączania pozwala na lepszą realizację tego założenia. Ponadto w przypadku uzależnienie wzmocnienia regulatora od prędkości przepływu i poziomu nagrzania błąd pomiaru stanu ustalonego prądu czujnika jest minimalny.

Realizacja zaproponowanej metody optymalizacji pasma przenoszenia termooanemometru dwustanowego wymaga specjalnej konstrukcji sterowanego układu stałotemperaturowego współpracującego z systemem komputerowym realizującym algorytm pomiarowy. Obecnie zaawansowane są prace nad konstrukcją i oprogramowaniem układu pomiarowego pozwalającego na praktyczną realizację proponowanych rozwiązań i eksperymentalną weryfikację wyników uzyskanych w procesie modelowania numerycznego.

Praca została wykonana w roku 2008 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Fiedler H.: *On Data Acquisition in Heated Turbulent Flows*; Proceedings of The Dynamic Flow Conference, Skovlunde, Denmark, 1978, 81-98.
- [2] Ligęza P.: *Anemometric method for measuring velocity and temperature in non-isothermal flows*; Archives of Mining Sciences 3, 1994, 367-380.
- [3] Ferreira R. P. C., Freire C. S., Deep G. S., Rocha Neto J. S., Oliveira A.: *Fluid temperature compensation in a hot wire anemometer using single sensor*; IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Baltimore, Maryland, 2000, 512-517.
- [4] Ligęza P.: *On unique parameters and unified formal form of hot-wire anemometric sensor model*; Review of Scientific Instruments 76, 2005, 126105-126108.
- [5] Ligęza P.: *Adaptive control in constant temperature anemometer*; Transactions of the Strata Mechanics Research Institute 8, 2006, 3-8.
- [6] Ligęza P.: *Transmission bandwidth forming in constant-temperature anemometer*; Transactions of the Strata Mechanics Research Institute 8, 2006, pp. 9-18.

Quasi-simultaneous velocity and temperature measurement in unsteady gas flows

Abstract

Hot-wire anemometric measurements of non-isothermal flows require the use of thermal compensation or correction circuitry. One possible solution is a two-state hot-wire anemometer that uses the cyclically changing heating level of a single sensor. The area in which flow velocity and fluid temperature can be measured is limited by the dimensions of the sensor's active element. The system is designed to measure flows characterized by high velocity and temperature gradients, although its transmission bandwidth is very limited. In this study, we propose a method to optimize the two-state hot-wire anemometer transmission bandwidth. The method is based on the use of a specialized constant-temperature system together with variable dynamic parameters. It is also based on a suitable measurement cycle paradigm. Analysis of the method was undertaken using model testing. Our results reveal a possible significant broadening of the two-state hot-wire anemometer's transmission bandwidth.

Keywords: Hot-wire anemometry, temperature correction, frequency bandwidth, computer simulation, optimization

Recenzent: Dr hab. Marek Gawor, Instytut Mechaniki Górotworu PAN