# Zaawansowane narzędzia metrologiczne w pomiarach wybranych parametrów środowiska. Optymalizowany dynamicznie termoanemometryczny system pomiarowy

Paweł Jamróz, Paweł Ligęza, Katarzyna Socha

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

#### Streszczenie

Termoanemometrię cechuje możliwość wykonywania pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości. Uzyskiwanie szerokich pasm przenoszenia sięgających 100 kHz umożliwia precyzyjne wyznaczanie parametrów przepływów związanych z występującym w nich zjawiskiem turbulencji. Pasmo przenoszenia standardowych termoanemometrycznych przyrządów do pomiaru prędkości przepływu nie jest jednak stałe. Na jego wartość oddziałuje wiele czynników związanych z charakterem przepływu, w szczególności jego prędkością średnią oraz samą konstrukcją termoanemometrycznego systemu pomiarowego. Drobne zmiany w układzie, jak np. zastosowanie czujnika o innych właściwościach dynamicznych, powoduje niekontrolowane rozregulowanie wcześniej zoptymalizowanej odpowiedzi dynamicznej systemu pomiarowego i ogranicza jego zdolności pomiarowe. Ważnym zagadnieniem naukowym staje się zatem opracowanie systemu umożliwiającego automatyczną optymalizację własnego pasma przenoszenia. Propozycję rozwiązania takiego problemu stanowi termoanemometryczny system do mierzenia prędkości przepływów z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych. W pracy zaprezentowano koncepcję takiego układu oraz jego badania modelowe oraz eksperymentalne.

Słowa kluczowe: termoanemometr stałopasmowy, właściwości dynamiczne systemu pomiarowego

#### 1. Wstęp

Termoanemometria jako jedna z nielicznych metod pozwalających na pomiary w przepływach szybkozmiennych znajduje szerokie zastosowanie szczególnie w pomiarach struktur turbulentnych. Spowodowane jest to między innymi małymi rozmiarami czujników, które nie wprowadzają znaczących zaburzeń przepływów oraz pozwalają na uzyskanie dużych rozdzielczości przestrzennych. Jedną z najważniejszych zalet termoanemometrii jest jednak możliwość uzyskania szerokiego pasma przenoszenia. W klasycznych układach termoanemometrycznych pasmo przenoszenia nie jest stałe i zmienia się wraz ze zmianą warunków pomiarowych. Zależy ono między innymi od średniej wartości prędkości oraz wielu innych czynników związanych z samym układem systemu pomiarowego, takich jak: rezystancja włókna pomiarowego czy parametry elektroniczne układu termoanemometru.

Powszechnie znane są prace autorów Freymutha [1-3], Watmuffa [4], Saddoughiego i Veeravalliego [5], Payne'a [6] oraz Li [7-9], w których dokonywana jest analiza pasma przenoszenia układów termoanemometrycznych. Prace te poświęcone są metodom analizy częstotliwościowej termoanemometrów oraz wpływom różnych czynników na dynamiczną odpowiedź układów termoanemometrycznych.

Prowadzone badania i zebrana literatura dotycząca charakterystyki częstotliwościowej takich układów wskazują na konieczność ich regulacji w sposób zapewniający optymalne pasmo przenoszenia w zależności od konfiguracji systemów oraz warunków w jakich dokonywane są pomiary. Istotnym zagadnieniem staje się zatem opracowanie układu termoanemometru o szerokim paśmie przenoszenia stałym w możliwie szerokim zakresie zmian czynników wpływających na jego dynamiczną odpowiedź. Analiza układu termoanemometru o szerokim paśmie przenoszenia dedykowanym do pomiarów szybkozmiennych w warunkach zmiennej

prędkości przepływu została przedstawiona w pracach [10-12]. Układ ten wykorzystuje adaptacyjny regulator działający tak, aby uzyskać stałe pasmo przenoszenia anemometru w funkcji prędkości przepływu.

W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję, badania modelowe oraz eksperymentalne nowego układu termoanemometrycznego pozwalającego na wprowadzenie algorytmów automatycznej regulacji jego właściwości dynamicznych w zależności od zmian warunków pomiarowych, takich jak prędkość przepływu. Układ pozwala również na uzyskanie optymalnie szerokiego pasma przenoszenia w zależności od konfiguracji systemu pomiarowego (np. zastosowanie różnych czujników o różnych rezystancjach).

# 2. Koncepcja układu termoanemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych

Uproszczony schemat termoanemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych został przedstawiony na rysunku 1. Układ ten zawiera czujnik pomiaru prędkości  $R_S$  włączony w jedną z gałęzi mostka rezystancyjnego oraz wzmacniacz operacyjny pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego. Czujnik wraz z rezystorem  $R_I$  oraz potencjometrem  $P_2$  stanowią mostek rezystancyjny będący układem komparacji rezystancji.



Rys. 1. Uproszczony schemat termoanemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych

Właściwości dynamiczne układu regulowane są poprzez włączenie dwóch potencjometrów pomiędzy górny punkt a masę mostka rezystancyjnego. Ślizgacz pierwszego potencjometru  $P_1$  podłączony jest do pierwszego szeregowego dwójnika RC o stałych parametrach, którego drugi koniec podłączony jest do odwracającego wejścia wzmacniacza operacyjnego. Pierwszy potencjometr pozwala na regulację w szerokim zakresie ujemnego sprzężenia zwrotnego dla składowej zmiennej. Regulacja tym potencjometrem pozwala na uzyskanie stabilnej pracy układu i wstępną optymalizację pasma przenoszenia. Rozwiązanie to pozwala w szczególności na stabilną pracę układu przy zerowym napięciu niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego. Ślizgacz drugiego potencjometru  $P_2$  podłączony jest do drugiego szeregowego dwójnika RC o stałych parametrach, którego drugi koniec podłączony jest do nieodwracającego wejścia wzmacniacza operacyjnego. Stała czasowa drugiego dwójnika RC jest znacząco mniejsza od stałej czasowej pierwszego dwójnika. Drugi potencjometr pozwala na regulację w szerokim zakresie dodatniego sprzężenia zwrotnego dla składowej zmiennej. Regulacja tym potencjometrem pozwala w szczególności na kompensację indukcyjności kabla czujnika oraz końcową optymalizację pasma przenoszenia.

Rozwiązanie to pozwala na regulację właściwości dynamicznych układu w szerokim zakresie przy zastosowaniu potencjometrów o niewielkiej rezystancji maksymalnej rzędu pojedynczych kiloomów. Umożliwia ona redukcję szumów oraz ograniczenie wpływu zakłóceń zewnętrznym polem elektromagnetycznym. Regulacja potencjometryczna nie wymaga stosowania elementów regulacyjnych o wysokiej stabilności, ponieważ element regulacyjny pracuje w układzie dzielnika napięcia. Ponadto w przypadku regulacji sygnałem cyfrowym możliwe jest zastosowanie dostępnych potencjometrów cyfrowych lub mnożących przetworników cyfrowo-analogowych. Rozwiązanie to jest w szczególności korzystne dla układów o szerokim zakresie regulacji, układów o niskim poziomie szumów i zakłóceń oraz dla układów regulowanych sygnałem cyfrowym. Układ ten zapewnia stabilną pracę anemometru przy zerowym napięciu niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego, co jest istotne dla utrzymania stałego współczynnika nagrzania czujnika pomiarowego.

#### 3. Model termoanemometru

W oparciu o przedstawiony na Rysunku 1 schemat został opracowany dynamiczny model matematyczny anemometru. W modelu wykorzystano dodatkową zależność opisującą dynamikę czujnika termorezystancyjnego z grzanym włóknem opisaną zgodnie z równaniem:

$$I_{S}^{2}R_{S} = (A_{S} + B_{S}V^{n_{S}})(R_{S} - R_{M}) + c_{S}\frac{dR_{S}}{dt}$$
(1)

gdzie:

$$I_S$$
 – prąd włókna,  
 $R_S$  – rezystancja nagrzanego włókna pomiarowego,  
 $V$  – prędkość przepływu medium,  
 $R_M$  – rezystancja włókna w temperaturze medium,  
 $A_S, B_S, n_S, c_S$  – parametry modelu czujnika,  
 $t$  – czas.

Jako zmienne stanu do opisu analizowanego układu termoanemometrycznego dodatkowo przyjęto chwilowe wartości napięć na kondensatorach  $C_1$  oraz  $C_2$ . W modelu zostały uwzględnione również zależności związane z matematycznym opisem regulatora proporcjonalno-całkującego. Zgodnie z powyższymi założeniami matematyczny model układu termoanemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych można zapisać zgodnie z następującymi zależnościami:

$$\frac{dU_{C1}}{dt} = \frac{U_A \left(\frac{P_{12}}{P_{11} + P_{12}} - \frac{R_S}{R + R_I}\right) - U_{C1}}{C_1(R_1 + R_3)}$$
(2)

$$\frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{U_A \left(\frac{P_{22}}{P_{21} + P_{22}} - \frac{P_B}{P_A + P_B}\right) - U_{C2}}{C_2 (R_2 + R_4)}$$
(3)

$$\frac{dU_A}{dt} = -\frac{1}{\tau_A} \left( U_A + k_A U_E \right) \tag{4}$$

$$\frac{dR_S}{dt} = \frac{\frac{U_A^2 R_S}{(R_S + R_I)^2} - (A + Bv^n)(R_S - R_M)}{C_S}$$
(5)

gdzie:

$$U_{E} = \frac{U_{A} \left(\frac{P_{12}}{P_{11} + P_{12}} + \frac{R_{1}}{R_{3}} \frac{R_{S}}{R_{S} + R_{I}}\right) - U_{C1}}{\frac{R_{1}}{R_{3}} + 1} - \frac{U_{A} \left(\frac{P_{22}}{P_{21} + P_{22}} + \frac{R_{2}}{R_{4}} \frac{P_{B}}{P_{A} + P_{B}}\right) - U_{C2}}{\frac{R_{2}}{R_{4}} + 1} - U_{0}$$
(6)

$$\tau_A = k_A R_A C_A \tag{7}$$

$$k_A = \frac{R_B}{R_A} \tag{8}$$

Współczynniki  $\tau_A$  oraz  $k_A$  związane są z parametrami regulatora PI. Parametr  $\tau_A$  symbolizuje jego stałą czasową, natomiast  $k_A$  odpowiada za wzmocnienie członu proporcjonalnego regulatora. Rezystory  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ stanowią składowe potencjometru  $P_1$  podzielonego ślizgaczem, natomiast rezystory  $P_{21}$  i  $P_{22}$  to składowe potencjometru  $P_2$ .

#### 4. Regulacja właściwości dynamicznych modelu termoanemometru

W oparciu o przedstawiony model matematyczny został przeprowadzony szereg symulacji mających na celu dobór wartości odpowiednich parametrów oraz sprawdzenie działania całego układu. Wartości parametrów opisujących model zebrano w tabelach 1-3. Tabela 1 przedstawia wartości dla elementów elektronicznych wchodzących w skład modelu układu termoanemometrycznego. W tabeli 2 zebrano wartości parametrów opisujących jeden z typowo stosowanych wzmacniaczy operacyjnych w układach termoanemometrycznych OP 27. Tabela 3 zawiera informację o parametrach modelu czujnika z grzanym włóknem. W symulacji użyto typowych wartości parametrów dla czujników z włóknem wolframowym o średnicy 3 μm.

Tab. 1. Wartości parametrów modelu termoanemometru									
$R_I$	Р	$P_1$	$P_2$	$C_1$	$C_2$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
Ω	Ω	Ω	Ω	nF	pF	Ω	Ω	Ω	Ω
10	10e3	10e3	10e3	47	350	1e3	100	100	100

Tab. 2. Wart	ości paramet	rów modelu r	egulatora PI

R <sub>A</sub>	$ au_A$	$k_A$
Ω	S	-
1e6	15e-3	1e6

1e6	15e-3	1e6	

$R_M$	$T_M$	$\alpha_S$	$A_S$	$B_S$	$c_S$	$n_S$
Ω	K	1/K	A <sup>2</sup>	$A^2 \sqrt{\frac{s}{m}}$	A <sup>2</sup> s	-
5	293	3,33e-3	2e-3	0,5e-3	0,5e-6	0,5

Tab. 3. Wartości parametrów modelu czujnika z włóknem wolframowym o średnicy 3 µm

Test częstotliwościowy przeprowadzono generując falę prostokątną na wejścia napięcia niezrównoważenia  $U_0$ . Jako sygnał mierzony rejestrowany był sygnał napięcia na włóknie czujnika  $U_{RS}$ . Symulacje rozpoczęto dla startowych nastaw potencjometrów P1 oraz P2 zapewniających powolną, ale stabilną dynamiczną odpowiedź modelu układu pomiarowego. Następnie dokonywano zmian w nastawach potencjometrów w sposób umożliwiający uzyskanie optymalnej odpowiedzi symulowanego modelu czujnika na zmieniającą się skokowo testową falę prostokątną. Optymalna odpowiedź układu cechuje się przeregulowaniem na poziomie 15%, natomiast czas  $\tau_w$  odpowiada ustaleniu się odpowiedzi układu na poziomie 97% maksymalnej amplitudy. W takim przypadku częstotliwość graniczna  $f_c$  wyraża się wzorem:

$$f_c = \frac{1}{1, 3 \cdot \tau_w} \tag{9}$$

Na rysunku 2 przedstawiono kolejne kroki w procesie regulacji zamodelowanego układu termoanemometrycznego. Wykresy a-e pokazują efekty regulacji potencjometru  $P_1$ . Dla startowej wartości  $P_{11} = 0.9$  $k\Omega$  oraz  $P_{21} = 10 k\Omega$  układ cechuje się powolną odpowiedzią dynamiczną. Stopniowa regulacja potencjometrem P1 znacznie skraca czas odpowiedzi układu, a w szczególności czas pierwszego przeregulowania, który osiąga minimalną wartość dla wartości  $P_{11}$ równej 3,7 k $\Omega$  (wykres d). Zwiększenie wartości rezystancji  $P_{11}$  do 4,92 k $\Omega$  prowadzi do dalszego skrócenia czasu pierwszego przeregulowania Jednak w odpowiedzi układu pojawiają się oscylacje, które zwiększają się wraz z dalszym zwiększaniem wartości rezystancji  $P_{11}$ prowadząc do osiągnięcia niestabilnego stanu pracy układu pomiarowego.

Redukcję oscylacji oraz końcową optymalizację pasma przenoszenia uzyskuje się poprzez regulację potencjometrem P2 (rysunek 2 wykresy f-i). Precyzyjne dobranie nastaw potencjometru P2 pozwala na



Rys. 2. Przykładowa regulacja modelu termoanemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych

osiągnięcie idealnej charakterystyki odpowiedzi układu termoanemometru na skok prędkości z blisko 15% przeregulowaniem w stosunku do maksymalnej wartości odpowiedzi. Taką charakterystykę uzyskano dla wartości rezystancji  $P_{21}$  wynoszącej 2,2 k $\Omega$ , dla której obliczona częstotliwość graniczna wynosiła 75,7 kHz.

Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły zdolność układu do regulacji jego właściwości dynamicznych. Dobranie optymalnego pasma przenoszenia uzależnione jest od warunków bezpośrednio wpływających na dynamiczną odpowiedź termoanemometru.

### 5. Rodzaj czujnika, prędkość przepływu a pasmo przenoszenia – model

W celu określenia wrażliwości badanego układu na zmianę czynników wpływających na jego pasmo przenoszenia oraz sprawdzenie jego możliwości regulacyjnych wykonano szereg symulacji polegających na zmianie poszczególnych parametrów modelu mogących posiadać wpływ na jego częstotliwość graniczną. Jako punkt startowy przyjęto nastawy potencjometrów  $P_{11} = 4,92$  oraz  $P_{21} = 2,2$  k $\Omega$ . Odpowiada to osiągniętemu optymalnemu pasmu przenoszenia dla warunków symulacji z przykładu sterowania opisywanego w paragrafie 4.

Pierwszy test regulacyjny dotyczył zmiany wartości parametrów modelu czujnika z włóknem o średnicy 3 μm, które zastąpiono wartościami odpowiadającymi modelowi czujnika 5 μm. Wartości tych współczynników zebrano w tabeli 4.

		-	-	-		
$R_M$	$T_M$	$\alpha_S$	$A_S$	$B_S$	$c_S$	$n_S$
Ω	K	1/K	A <sup>2</sup>	$A^2 \sqrt{\frac{s}{m}}$	A <sup>2</sup> s	-
5	293	3,33e-3	4e-3	2-3	4e-6	0,5

Tab. 4. Wartości parametrów modelu czujnika z włóknem wolframowym o średnicy 5 µm

Zmiana parametrów opisujących czujnik spowodowała zmianę w kształcie dynamicznej odpowiedzi czujnika, która dla wartości wcześniej optymalnych teraz zaczęła odbiegać od idealnej charakterystyki (rysunek 3a). Spowodowało to również wydłużenie czasu odpowiedzi dynamicznej modelu układu termoanemometru.



Rys. 3. Regulacja właściwości dynamicznych, czujnik 5 μm a) nastawy optymalne dla czujnika 3μm, b) nastawy optymalne dla czujnika 5 μm

Zmiana nastaw potencjometrów regulacyjnych umożliwiła ponowne uzyskanie odpowiedzi układu bliskiej optymalnej odpowiedzi dynamicznej dla układów termoanemometrycznych. Spowodowało to również poszerzenie pasma przenoszenia i osiągnięcie częstotliwości granicznej o wartości 48,13 kHz.

Kolejne badania symulacyjne dotyczyły zmiany wartości prędkości przepływu w modelowanym układzie termoanemometrycznym. Parametry symulacji przyjęto zgodnie z parametrami symulacji przedstawionymi w paragrafie 4 z uwzględnieniem skokowej zmiany prędkości przepływu z 20 do 1 m/s. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 4. Rysunek 4a przedstawia odpowiedź dynamiczną układu termoanemometru przy prędkości przepływu rzędu 1 m/s, zoptymalizowaną do prędkości przepływu 20 m/s.

Zmniejszenie symulowanej prędkości przepływu pogorszyło właściwości dynamiczne układu powodując jednocześnie zniekształcenie idealnej charakterystyki odpowiedzi dynamicznej modelu termoanemo-



Rys. 4. Regulacja właściwości dynamicznych, czujnik 5 μm a) nastawy optymalne dla prędkości 20 m/s, b) nastawy optymalne dla prędkości 1m/s

metru. Ponowna regulacja potencjometryczna pozwoliła na uzyskanie charakterystyki zbliżonej do idealnej, na podstawie której wyznaczono częstotliwość graniczną układu o wartości 39,11 kHz, (rysunek 4b).

Przeprowadzone badania modelowe pozwoliły na pozytywne zweryfikowanie działania przedstawionego modelu termoanemometru. Szereg przeprowadzonych symulacji wykazał też możliwość stworzenia algorytmu automatycznej optymalizacji pasma przenoszenia systemu pomiarowego.

#### 6. Rzeczywisty układ pomiarowy

W oparciu o przedstawiony model i założenia koncepcyjne został stworzony rzeczywisty układ pomiarowy pracujący zgodnie z przyjętymi założeniami badanego modelu termoanemometru. System zaprezentowano na rysunku 5. Składa się on z układu komunikacyjnego oraz ośmiu kanałów pomiarowych, mogących pracować jako termoanemometr stałotemperaturowy lub termometr stałoprądowy.

Układ wejściowy służy do komunikacji i sterowania poszczególnymi torami pomiarowymi. Wykorzystano w nim trzy dwukierunkowe porty równoległe obsługiwane po magistrali I<sup>2</sup>C. Dzięki zaimplemen-



Rys. 5. Rzeczywisty układ dynamicznie optymalizowanego termoanemometrycznego systemu pomiarowego

towanym układom możliwym staje się wybór kanałów pomiarowych oraz ich konfiguracja. Drugi układ realizuje zadania pomiarowego kanału termoanemometrycznego. Wykorzystano w nim sterowane cyfrowo układy potencjometrów umożliwiające w szczególności: pomiar wartości rezystancji czujnika pracującego z danym torem pomiarowym, ustawienie współczynnika nagrzania, realizację testu częstotliwościowego umożliwiającego określenie właściwości dynamicznych toru przetwarzania oraz optymalizację pasma przenoszenia kanału pomiarowego. Całość sterowana jest z wykorzystaniem układu kontrolno-pomiarowego NI-USB 6009 oraz stworzonego oprogramowania w środowisku LabVIEW.

#### 7. Regulacja właściwości dynamicznych układu termoanemometru

Właściwości regulacyjne układu zostały zweryfikowane na stanowisku pomiarowym złożonym z tunelu aerodynamicznego oraz termoanemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych, do którego dołączono jednowłóknową sondę pomiarową o średnicy włókna 3 µm. Optymalizacja dynamiczna toru pomiarowego dokonywana była w przepływie o prędkości 5 m/s. Na rysunku 6 przedstawiono kolejne kroki regulacji prowadzącej do uzyskania optymalnego pasma przenoszenia termoanemometrycznego układu pomiarowego. Rysunki 6a-6e przedstawiają efekty z użyciem potencjometru  $P_1$ . Podobnie jak w przypadku prezentowanego modelu układu, wzrost wartości rezystancji  $P_{11}$  umożliwia wstępne doregulowanie układu, poprzez skracanie czasu trwania pierwszego przeregulowania. Istotnym jest znalezienie granicy wartości  $P_{11}$ , dla której w odpowiedzi dynamicznej układu zaczynają powstawać oscylacje, nie powodujące niestabilnej pracy układu, a które można jeszcze zniwelować poprzez proces doregulowania potencjometrem  $P_{21}$ . Dla analizowanego przypadku odpowiedź taką zarejestrowano dla wartości  $P_{11}$  wynoszącej 3,007 k $\Omega$ . Tak wstępnie zoptymalizowana odpowiedź układu poddana została fazie końcowej optymalizacji z użyciem potencjometru  $P_2$ , Rysunek 6f-6j. Zmniejszając wartość potencjometru  $P_{21}$  dochodzi się do uzyskania idealnej dynamicznej odpowiedzi układu pomiarowego nacechowanej 15-sto procentowym przeregulowaniem. Uzyskane w ten sposób pasmo przenoszenia wynosi 75,41 kHz.

Przedstawiony proces regulacji rzeczywistego układu pomiarowego uzyskuje bardzo dużą zbieżność z przeprowadzonymi badaniami modelowymi. Różnice w wartościach rezystancji potencjometrów regulacyjnych, w punktach optymalnego dostrojenia, wynikają z nieidealnie dobranych wartości parametrów modelu oraz różnych warunków symulacji i rzeczywistych eksperymentów, których nie uwzględnia przedstawiony model termoanemometru. Do takich parametrów należą między innymi właściwości przepływającego medium jak wilgotność, ciśnienie oraz skład chemiczny gazu, rezystancje przewodów doprowadzających sygnał do czujników oraz szereg innych czynników mogących w różnym stopniu wpływać na dynamiczną odpowiedź prezentowanego układu pomiarowego, jak np. właściwości użytych elementów elektronicznych.

## Rodzaj czujnika, prędkość przepływu a pasmo przenoszenia – rzeczywisty układ

Podobnie jak w przypadku modelu, w rzeczywistym układzie pomiarowym dokonano badań mających na celu określenie wpływu, jaki na pasmo przenoszenia wywierają zmiana czujnika oraz zmiana prędkości przepływu. Badania wykonano w tunelu aerodynamicznym W pierwszym etapie dla prędkości 10 m/s dokonano optymalizacji pasma przenoszenia układu termoanemometrycznego wyposażonego w czujnik o średnicy włókna 3 µm. Dla takich nastaw została zarejestrowana odpowiedź dynamiczna układu jak na rysunku 7a, dla której wyznaczone pasmo przenoszenia wynosi 69,93 kHz. Następnie nie zmieniając ustawienia potencjometrów  $P_1$  oraz  $P_2$  dokonano zamiany sondy pomiarowej na czujnik z włóknem pomiarowym o średnicy 5 µm, (rysunek 7c). Uzyskana odpowiedź dynamiczna w tym przypadku odbiega od idealnej charakterystyki z 15% przeregulowaniem i odznacza się dużo dłuższą odpowiedzią układu na wymuszenie sygnałem testującym. Odpowiedź dynamiczna układu dla tego przypadku została przedstawiona na rysunku 7b. W końcowej fazie eksperymentu dokonano optymalizacji pasma przenoszenia termoanemometrycznego systemu pomiarowego współpracującego z sondą 5 µm. Dla nastaw potencjometrów  $P_{11} = 3906,25 \Omega$  oraz  $P_{21} = 3476,56 \Omega$  uzyskano odpowiedź dynamiczną układu o częstotliwości granicznej wynoszącej 42,73 kHz.

Przeprowadzone badania eksperymentalne, tak jak w przypadku modelu potwierdziły konieczność optymalizacji pasma przenoszenia termoanemometru przy stosowaniu czujników o różnych średnicach włókien.



Rys. 6. Przykładowa regulacja układu termoanemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych

Kolejny eksperyment dotyczył badania wpływu zmiany średniej prędkości przepływającego medium na pasmo przenoszenia termoanemometrycznego układu pomiarowego. Eksperymenty przeprowadzono dla wstępnie zoptymalizowanego układu wyposażonego w sondę z włóknem o średnicy 3 µm umieszczonego w przepływie o średniej wartości prędkości wynoszącej 17 m/s. W tym przypadku uzyskana graniczna czę-



Rys. 7. Wpływ zmiany czujnika na optymalną dynamiczną odpowiedź układu termoanemometrycznego

stotliwość wynosiła 68,07 kHz Następnie stopniowo obniżano prędkość do wartości 1 m/s. Dla kolejnych średnich wartości przepływu rejestrowano dynamiczną odpowiedź systemu na test częstotliwościowy. Wyniki eksperymentu dla wybranych prędkości przedstawiono na rysunku 8.

Wraz ze zmianą prędkości następuje zniekształcenie charakterystyki dynamicznej odpowiedzi systemu termoanemometrycznego oraz znaczne pogorszenie jego właściwości dynamicznych. Dzięki możliwości optymalizacji właściwości dynamicznych możliwa była regulacja pasma przenoszenia układu i zoptymalizowanie go do poziomu 64,10 kHz. Zoptymalizowana odpowiedź układu została przedstawiona na rysunku 9.

#### 9. Podsumowanie

Warunki pracy termoanemometrów często odbiegają od warunków, w których były one wzorcowane i dla których dobór odpowiednich parametrów zapewnia optymalną dynamikę ich pracy. Powoduje to konieczność tworzenia nowych rozwiązań konstrukcyjnych i stosowania procedur pozwalających dokonywać optymalizacji pasma przenoszenia takich systemów pomiarowych. Koncepcja anemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych została przedstawiona w niniejszym artykule. Zaprezentowane badania symulacyjne oraz eksperymentalne wykazały dużą wrażliwość układów termoanemometrycznych na różne konfiguracje ich pracy i zmiany warunków pomiarowych oraz dużą skuteczność proponowanej metody optymalizacji pasma przenoszenia z wykorzystaniem analizowanego układu pomiarowego.

Praca została wykonana w roku 2010 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.



Rys. 8. Wpływ prędkości na pasmo przenoszenia termoanemometrycznego układu pomiarowego



Rys. 9. Zoptymalizowana odpowiedź układu termoanemometrycznego, v = 1 m/s

#### Literatura

- [1] Freymuth P., 1967. *Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers*. Review of Scientific Instruments, t. 38, s. 677-681.
- [2] Freymuth P., 1977. *Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers*. Journal of Physics E.: Scientific Instruments; t. 10, s. 705-710.
- [3] Freymuth P., 1998. On higher order dynamics of constant-temperature hot-wire anemometers. Measurement Science and Technology, t. 9, s. 534-535.
- [4] Watmuff J.H.. *Investigation of the constant-temperature hot-wire anemometer*. Experimental Thermal and Fluid Science, t. 11, nr 2, s. 117-134.
- [5] Saddoughi S.G., Veeravalli S.V., 1996. Hot-wire anemometry behaviour at very high frequencies. Measurement Science and Technology; t. 7, s. 1297-1300
- [6] Payne S.J., 2001. Unsteady loss in a high pressure turbine stage. Rozprawa doktorska, Department of Engineering Science, University of Oxford.
- [7] Li D.J., 2004. Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements. Measurement Science and Technology, t. 15, nr 9, s. 1835-1847.
- [8] Li D.J., 2005. The effect of electronic components on the cut-off frequency of the hot-wire system. Measurement Science and Technology, t. 16, nr 3, s. 766-774.
- [9] Li D.J., 2006. *Dynamic response of constant temperature hot-wire system under various perturbation*. Measurement Science and Technology, t. 17, nr 10, s. 2665-2675.
- [10] Ligeza P., 2007. Constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer. Review of Scientific Instruments, t. 78.
- [11] Ligeza P., 2008. Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant temperature anemometer. Review of Scientific Instruments, t. 79.
- [12] Ligeza P., 2009. An investigation of a constant-bandwidth hot-wire anemometer. Flow Measurement and Instrumentation, t. 20, nr 3, s. 116-121.

#### Advanced metrological tool designed to natural environment parameters measurements. Hot-wire-anemometer with bandwidth optimization

#### Abstract

This article presents model simulation and experimental researches of hot-wire anemometer, which allows to control measurement system bandwidth. New solution of hot-wire anemometer allows to velocity measurements with the optimal system bandwidth.

Keywords: hot-wire anemometry, model simulations, dynamic properties of anemometer