

# Modernizacja i rozwój stanowisk badawczych pod kątem opracowywanych nowych metod pomiaru wybranych parametrów środowiska – termooanemometr z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych

PAWEŁ JAMRÓZ, PAWEŁ LIGEZA

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

## Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję i badania eksperymentalne termooanemometrycznego układu do mierzenia prędkości przepływów z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych. Na układ termooanemometru składa się 8 kanałów mogących pracować w trybie stałotemperaturowego termooanemometru (CTA) lub stałoprądowego termometru (CCT). Nowe rozwiązanie układu do pomiaru prędkości i temperatury przepływów cechuje możliwość regulacji właściwości dynamicznych zależnych od takich czynników jak rodzaj czujnika, prędkość przepływu, w którym czujnik się znajduje, długość i rodzaj przewodów łączących czujnik z termooanemometrem oraz innych parametrów posiadających wpływ na pasmo przenoszenia systemu pomiarowego. Analiza wpływu tych czynników na pasmo przenoszenia układu termooanemometrycznego oraz sposób ich kompensacji został przedstawiony w niniejszym artykule.

**Słowa kluczowe:** termooanemometria, właściwości dynamiczne anemometru

## 1. Wstęp

W ramach realizowanego tematu „Zaawansowane narzędzia metrologiczne w pomiarach wybranych parametrów środowiska – modernizacja i rozwój stanowisk badawczych” opracowana została innowacyjna koncepcja stałotemperaturowego anemometru z regulacją właściwości dynamicznych. Anemometr ten jest nowym rozwiązaniem komputerowo sterowanego systemu do pomiaru prędkości przepływów i jest przedmiotem patentu.

Anemometryczna, stałotemperaturowa metoda pomiaru prędkości przepływu cieczy i gazów jako czujnik pomiarowy wykorzystuje element nagrzewany do temperatury wyższej niż temperatura badanego medium. Element ten stanowi rezystancyjny przetwornik temperatury, przez który wymuszany jest przepływ prądu zapewniający utrzymanie stałej rezystancji czujnika, a w konsekwencji jego stałej temperatury niezależnie od zmieniających się warunków wymiany ciepła. Układ taki pozwala również na pomiar wartości elektrycznych związanych z zasilaniem czujnika, będących jednocześnie funkcjami zmian warunków wymiany ciepła między czujnikiem, a otoczeniem w którym się znajduje. Dzięki tym właściwościom, na podstawie pomiarów możliwym staje się określenie prędkości przepływającego medium opływającego sondę [1, 2].

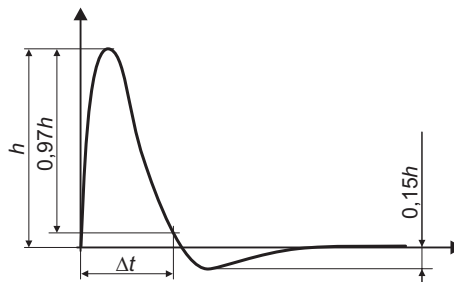
Jedną z istotnych właściwości pomiarów termooanemometrycznych, dzięki którym metoda ta jest powszechnie wykorzystywana jest możliwość punktowego pomiaru chwilowych wartości prędkości przepływającego medium, co umożliwia niewielki rozmiar sondy pomiarowej i jej szerokie pasmo przenoszenia.

## 2. Dynamiczna odpowiedź termooanemometru

Odpowiedź dynamiczna termooanemometru wiąże się ściśle z jego reakcją napięciową lub prądową na zmieniającą się prędkość i temperaturę przepływu medium w którym czujnik się znajduje. Weryfikacja tak zdefiniowanego pojęcia wiązałaby się jednak z koniecznością wygenerowania okresowo zmiennego pola prędkości. Określenie właściwości dynamicznych termooanemometru wymagałoby również aby pole to mogło być kontrolowane w szerokim paśmie częstotliwości. Na podstawie znajomości właściwości przepływu i pomiarów odpowiedzi termooanemometru można byłoby dokonać oceny jego właściwości dynamicznych. Przeprowadzenie takich eksperymentów nie jest jednak możliwe z uwagi na niemożliwość wygenerowania ściśle określonych harmonicznie zmiennych pól prędkości przepływu. Dlatego też w badaniu dynamiki układów termooanemometrycznych stosuje się zabieg polegający na wykorzystaniu generatora okresowo zmiennego sygnału prądowego (fala prostokątna) wbudowanego w obwód termooanemometru. Symuluje on skokową wartość prędkości, wywołującą określoną odpowiedź napięciową, która może zostać poddana analizie pod kątem określenia własności dynamicznych systemu [2].

Dla określonych warunków pomiarowych oraz danej konfiguracji termooanemometru dobiera się tak parametry regulacyjne aby odpowiedź układu na sygnał prostokątny miała piętnasto procentowe przeregulowanie. Dla takiego doboru nastaw czas  $\Delta t$  określa się jako czas po którym odpowiedź układu osiąga 3% swojej maksymalnej wartości. Na rysunku 1 przedstawiono poprawną odpowiedź termooanemometru użyciem testu częstotliwościowego, na podstawie której możliwa jest ocena pasma przenoszenia całego systemu  $f_c$  zgodnie z zależnością 1 [3, 5, 6].

$$f_c = \frac{1}{1,3 \cdot \Delta t} \quad (1)$$



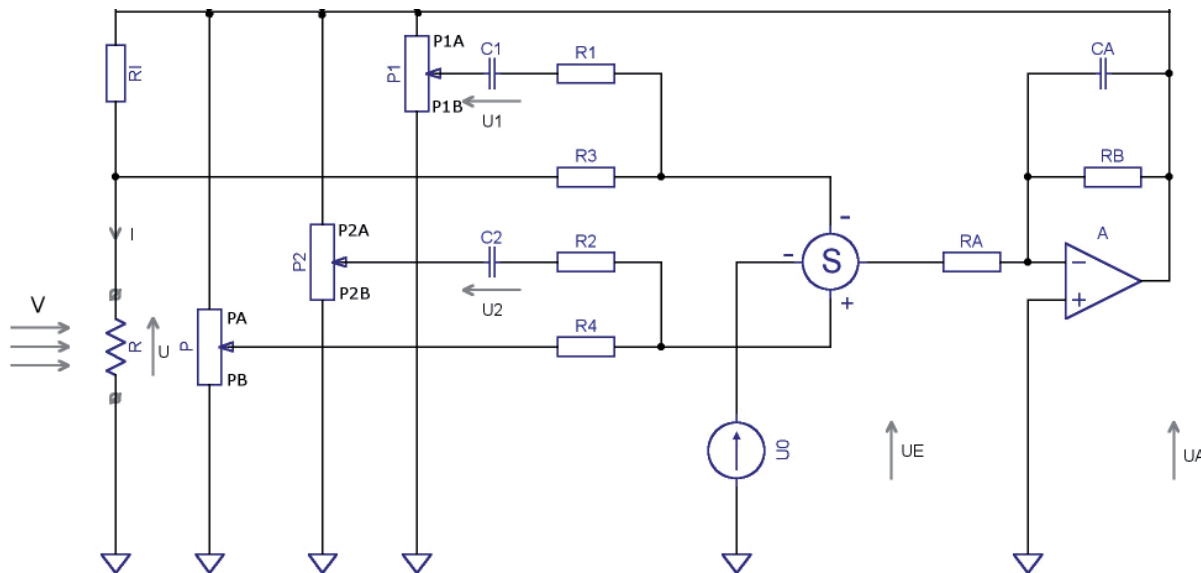
Rys. 1. Charakterystyka dynamiczna termooanemometru

Sygnał pomiarowy termooanemometru nie jest rejestrowany bezpośrednio jako odpowiedź czujnika, zatem wpływ na jego przebieg dynamiczny posiadać będzie szereg czynników związanych nie tylko z sondą pomiarową i warunkami jej pracy (zmiana prędkości przepływu). Na dynamikę systemu posiadać będą również wpływ parametry odpowiadające za strukturę samego urządzenia (elektronika) jak i również sposób doprowadzenia sygnałów do oraz z sondy pomiarowej. Analizie dynamicznej podlega zatem kompletny tor przetwarzania sygnału. O dynamice takiego systemu pomiarowego decydować będą wszystkie jego elementy. Zmiana któregośkolwiek z nich (jak zmiana długości przewodów łączących czujnik z urządzeniem, co za tym idzie zmiana ich rezystancji i indukcyjności) powodować będzie zmianę przebiegu odpowiedzi dynamicznej systemu termooanemometrycznego. Dokonując pomiarów prędkości przepływu z użyciem termooanemometru, chcąc zachować optymalne pasmo przenoszenia koniecznym staje się „dostrajanie” układu do bieżącej konfiguracji i warunków pomiarowych.

Optymalnym rozwiązaniem byłby termooanemometr zdolny dokonywać automatycznej samoregulacji swoich właściwości dynamicznych w zależności od warunków jego pracy. W dalszej części artykułu przedstawiono koncepcję i realizację takiego układu.

### 3. Konstrukcja termoanemometru

Układ anemometru zbudowany jest z czujnika pomiaru prędkości włączonego w jedną z gałęzi mostka rezystancyjnego oraz wzmacniacz operacyjny pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego. Schemat ideowy takiego układu przedstawiony jest na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat układu anemometru stałotemperaturowego z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych

#### 3.1. Pomiar rezystancji

Pomiar rezystancji czujnika, regulacja właściwości dynamicznych układu anemometru, dobór wzmacnienia układu oraz regulacja parametrów generatora fali prostokątnej odbywają się za pomocą potencjometrów, na które składają się potencjometry P, P1 oraz P2. Do układu użyto 256-krokowe, regulowane oporniki o wartościach 10kΩ serii MCP42010 firmy Microchip. Regulacja potencjometrów odbywa się z wykorzystaniem interfejsu cyfrowego, za pośrednictwem którego do układów podawana jest wartość ośmiobitowa  $D_n$  odpowiadająca za wartość ich rezystancji.

Mostek rezystancyjny zbudowany jest zatem z czujnika, rezystora  $R_I$  oraz potencjometru P. Pomiar rezystancji czujnika R dokonywany jest poprzez równoważenie mostka dobierając odpowiedni stosunek rezystancji PA do PB. Dla stanu równowagi mostka można zapisać wzór na rezystancję czujnika R.

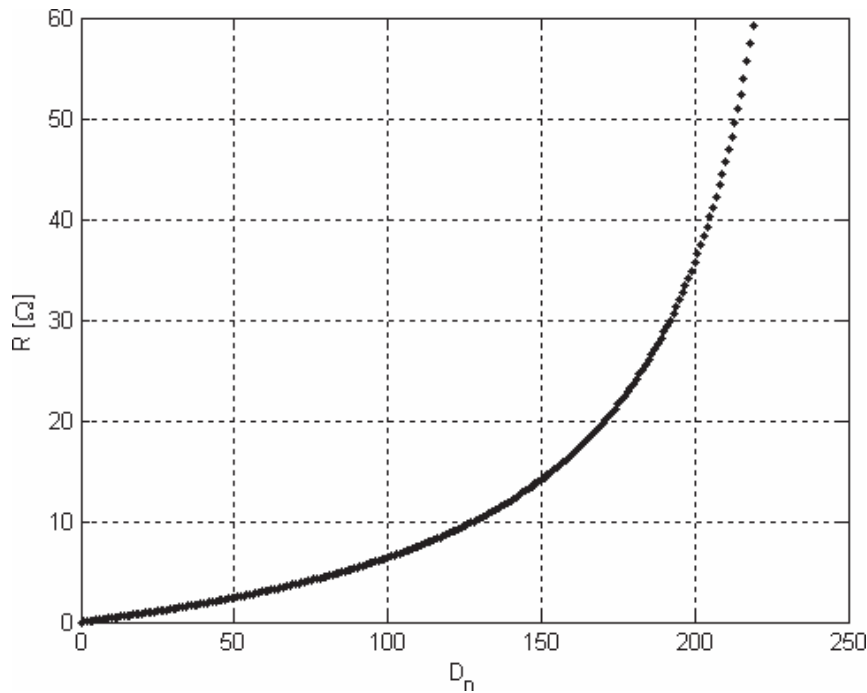
$$R = R_I \cdot \frac{PA}{PB} \tag{2}$$

co po uwzględnieniu zależności regulacyjnych potencjometrów [8] prowadzi do uzyskania równania (3)

$$R = R_I \cdot \frac{D_N}{256 - D_N} \tag{3}$$

Jedną z właściwości potencjometrów serii MCP42010 jest ich nieliniowa zależność rezystancji w funkcji regulacji. Poprzez dobór odpowiednich parametrów układu właściwość ta została wykorzystana tak, aby uzyskać jak najdokładniejszy pomiar rezystancji w zakresie odpowiadającym rezystancjom czujników termoanemometrycznych.

Rysunek 3 przedstawia wykres zależności rezystancji czujnika w funkcji regulacji potencjometru, za którą odpowiada parametr  $D_n$ . W zakresie małych rezystancji rozdzielczość pomiaru rezystancji zmienia się w zakresie od 0.04 do 0.135 Ω przy oporności czujnika od 0 do 10 Ω. Szacuje się że taka rozdzielczość pozwoli w eksperymentalnych badaniach na uwzględnienie wpływu rezystancji przewodów łączących czujnik z urządzeniem na dynamiczną odpowiedź termoanemometru.



Rys. 3. Zdolność rozdzielcza pomiaru rezystancji czujnika w funkcji  $D_n$

### 3.2. Regulacja właściwości dynamicznych

Właściwości dynamiczne regulowane są za pomocą dwóch potencjometrów P1 oraz P2 włączonych pomiędzy górny punkt a masę mostka rezystancyjnego jak na rysunku 2. Pierwszy potencjometr pozwala na regulację w szerokim zakresie ujemnego sprzężenia zwrotnego dla składowej zmiennej. Regulacja tym potencjometrem daje możliwość uzyskania stabilnej pracy układu i wstępną optymalizację pasma przeniesienia. Rozwiązanie to w szczególności umożliwia stabilną pracę układu przy zerowym napięciu niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego, co jest istotne dla utrzymania stałego współczynnika nagrzania czujnika pomiarowego. Drugi potencjometr pozwala na regulację w szerokim zakresie dodatniego sprzężenia zwrotnego dla składowej zmiennej. Regulacja tym potencjometrem umożliwia kompensację indukcyjności kabla czujnika oraz końcową optymalizację pasma przeniesienia.

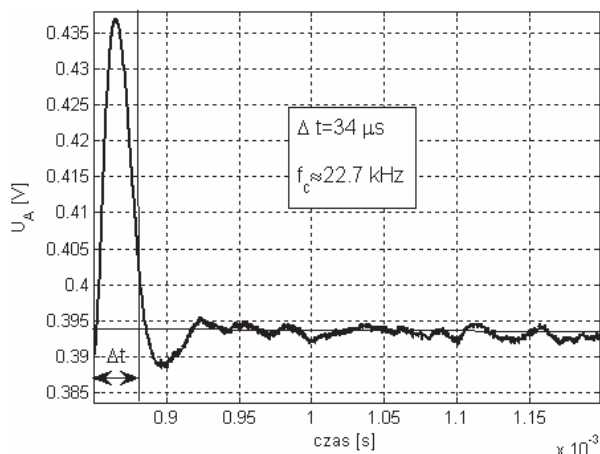
Rozwiązanie to pozwala na regulację właściwości dynamicznych układu w szerokim zakresie przy zastosowaniu potencjometrów o niewielkiej rezystancji maksymalnej rzędu pojedynczych kiloomów. Daje możliwość redukcji szumów oraz ograniczenia wpływu zakłóceń zewnętrznym polem elektromagnetycznym. Regulacja 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.

Anemometr pracujący w oparciu o przedstawioną koncepcję znajduje szczególne zastosowanie w pomiarach wymagających szerokiego zakresu regulacji oraz bardzo niskich poziomów zakłóceń.

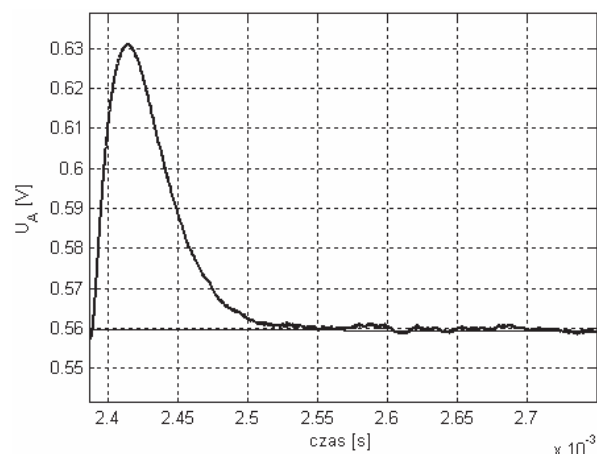
## 4. Badania eksperymentalne

### 4.1 Wpływ średnicy czujnika na pasmo przeniesienia termooanemometru

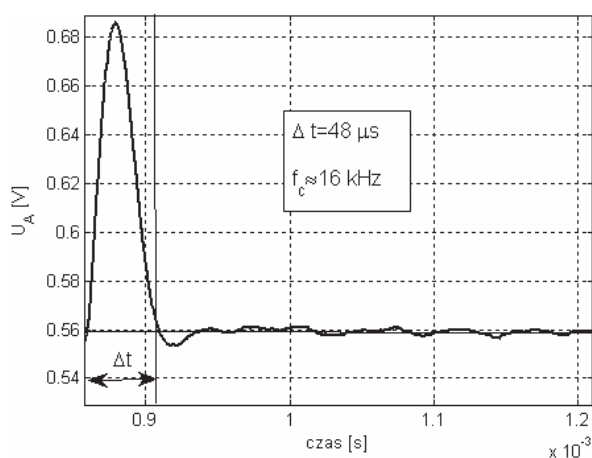
Jednym z podstawowych czynników wpływających na dynamikę termooanemometrycznego systemu pomiarowego jest czujnik, a dokładnie rodzaj materiału z jakiego został wykonany i jego wymiary geometryczne (długość i średnica). Analiza dynamiki samego włókna, zamodelowanego jako obiekt inercyjny pierwszego rzędu rozpatrywana została w [4] oraz [9]. Do badań eksperymentalnych użyto sondy termooanemometrycznej wykonane z wolframu o średnicach 3 i 5  $\mu\text{m}$ . Badania dynamicznej odpowiedzi systemu pomiarowego wykonano w warunkach bez przepływu, z wykorzystaniem wbudowanego w system generatora fali prostokątnej.



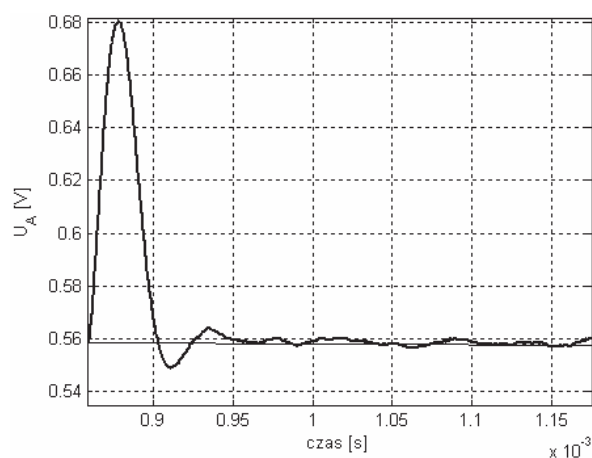
Rys. 4.



Rys. 5.



Rys. 6.



Rys. 7.

W pierwszej fazie poprzez regulację potencjometrów P1 i P2 dokonano optymalizacji pasma przenoszenia systemu dla włókna o średnicy 3  $\mu\text{m}$ . Dla takiego włókna w warunkach bez przepływu uzyskano pasmo przenoszenia na poziomie 22,7 kHz (rysunek 4). Następnie nie zmieniając nastaw regulacyjnych badaniu odpowiedzi dynamicznej poddano system z włóknem o grubości 5  $\mu\text{m}$ . Dla takiej konfiguracji otrzymano odpowiedź dynamiczną systemu przedstawioną na rysunku 5. W związku z tym, że odpowiedź ta nie jest zgodna z charakterystyką, na podstawie której można określić pasmo przenoszenia nie było możliwe dokładne jego wyznaczenie. Można jedynie oszacować na podstawie czasu ustalenia odpowiedzi, że pasmo przenoszenia w tym przypadku jest na poziomie 6,8 kHz. Dla takiej konfiguracji układu dokonano optymalizacji odpowiedzi dynamicznej, dzięki której udało się zwiększyć dynamikę systemu ponad 2 krotnie uzyskując 16 kHz (Rysunek 6). Dla tak dobranych optymalnych nastaw przeprowadzono również badania dynamiki systemu z zastosowaniem innej sondy, z włóknem o takiej samej średnicy. W tym przypadku pasmo przenoszenia systemu nie wymagało dalszej optymalizacji.

Przeprowadzone badania dynamicznej odpowiedzi termooanemometrycznego systemu pomiarowego potwierdziły konieczność optymalizacji pasma przenoszenia termooanemometru przy stosowaniu czujników o różnych średnicach włókien.

#### 4.2. Wpływ długości przewodów na pasmo przenoszenia termooanemometru

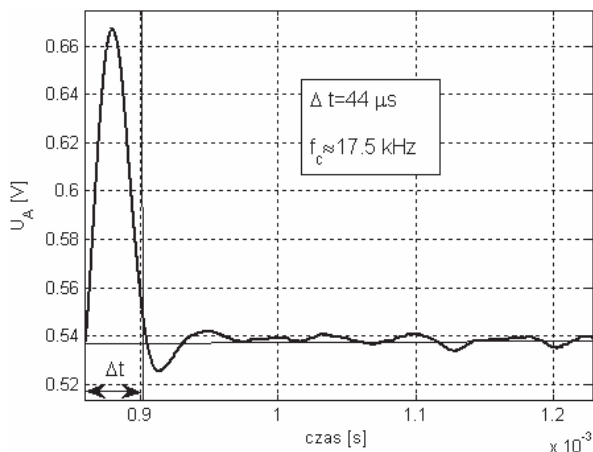
W kolejnym etapie przebadano wpływ długości przewodu łączącego czujnik z termooanemometrem na odpowiedź dynamiczną termooanemometru. Do badania użyto sondę z włóknem wolframowym o średnicy 5  $\mu\text{m}$ . sonda standardowo połączona jest z kablem koncentrycznym o długości 1,77 metra. Kabel ten przedłużano o 2 oraz o 5 metrów, dla każdej z konfiguracji wykonując analizę dynamiczną systemu pomiarowego. W tabeli nr 1 przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji każdej z konfiguracji pomiarowych.

Konfiguracja pomiarowa	Długość kabla przedłużającego [m]	Rezystancja całości [ $\Omega$ ]	Rezystancja kabla przedłużającego [ $\Omega$ ]
Sonda z włóknem 5 $\mu\text{m}$	brak	5.32	–
Obsadka sondy	2	6.20	0.88
Kabel o długości 1.77 m	5	9.54	4.22

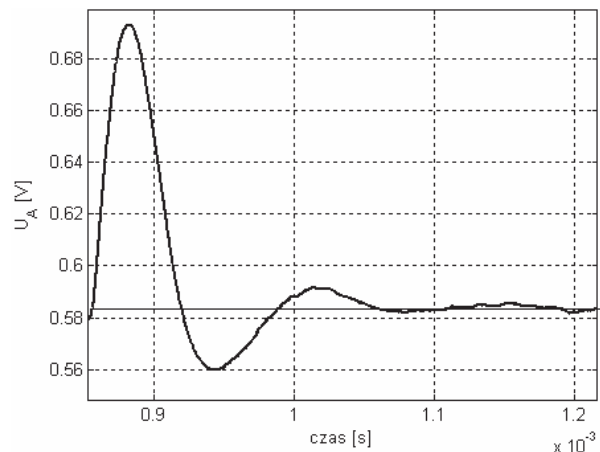
Pomiar rezystancji przeprowadzony był z wykorzystaniem omawianego systemu termooanemometrycznego. Rezystancję kabla przedłużającego wyznaczono jako różnicę rezystancji układu z kablem przedłużającym i bez niego. Następnie dokonano badania i optymalizacji pasma przenoszenia układu termooanemometrycznego. Eksperymenty wykonano w warunkach bez przepływu powietrza, dla tych samych parametrów amplitudy i częstotliwości testowej fali prostokątnej. Do badań przyjęto współczynnik nagrzania włókna 1.5.

W pierwszej fazie poprzez regulację potencjometrów P1 i P2 uzyskano optymalne pasmo przenoszenia dla układu konfiguracyjnego bez kabla przedłużającego ( $f_c = 17.5$  kHz). Wynik regulacji przedstawiono na rysunku 8. Następnie przy zachowanych parametrach nastaw potencjometrów przedłużono kabel łączący czujnik z układem pomiarowym o 2 metry. Analiza dynamiczna takiego układu (rysunek 9) wykazała, że optymalne ustawienie dla konfiguracji z krótszym kablem nie jest optymalnym rozwiązaniem przy konfiguracji układu z kablem przedłużonym. W otrzymanej charakterystyce dynamicznej układu pojawiają się przeregulowania, które powodują znaczne zmniejszenie pasma przenoszenia układu (2-krotne). Dopiero odpowiednia regulacja nastaw potencjometrów P1 i P2 prowadzi do uzyskania charakterystyki zbliżonej do idealnej. Odpowiedź dynamiczna układu po optymalizacji pasma przenoszenia przedstawiono na rysunku 10. Dla tych nastaw pasmo przenoszenia wynosiło 16.6 kHz.

Podobną procedurę zastosowano dla kabla przedłużającego o długości 5 m. W przypadku optymalnych nastaw potencjometrów regulacyjnych dla konfiguracji układu bez kabla przedłużającego przy zastosowaniu przedłużenia 5 m układ uległ wzbudzeniu. Regulacja potencjometryczna właściwości dynamicznych w tym przypadku pozwoliła na wyprowadzenie układu z stanu wzbudzenia i doprowadziła do optymalnego przebiegu odpowiedzi dynamicznej czujnika. W takiej konfiguracji pasmo przenoszenia zmalało cztero-krotnie do wartości 4.1 kHz, co przedstawiono na rysunku 11.



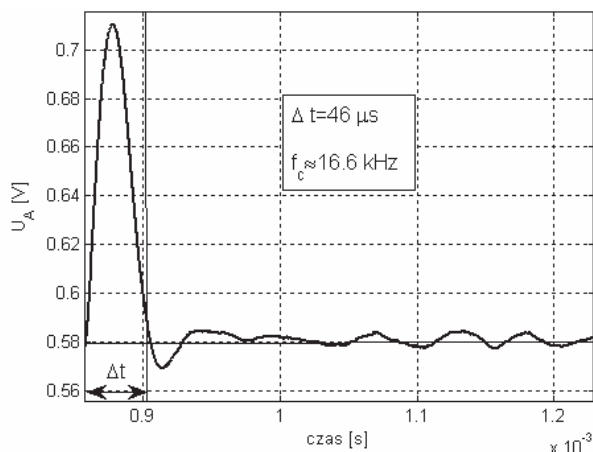
Rys. 8.



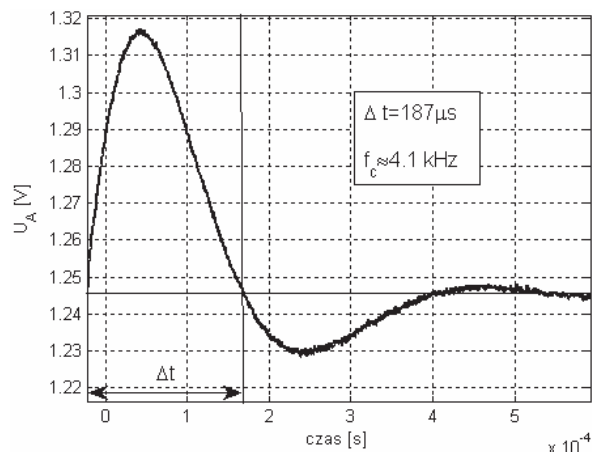
Rys. 9.

Wyniki eksperymentów pokazały, że zmiana długości przewodów łączących czujnik z termooanemometrem ma istotny wpływ na właściwości dynamiczne całego systemu pomiarowego. Coraz dłuższa linia łącząca czujnik z termooanemometrem powoduje pogorszenie się właściwości dynamicznych całego układu pomiarowego. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują na konieczność optymalizacji pasma przenoszenia układu pomiarowego pod tym kątem.

Wpływ zwiększonej rezystancji doprowadzenia jest widoczny nie tylko w dynamice termooanemometru. Ma on również znaczenie przy doborze współczynnika nagrzania włókna pomiarowego, który obecnie



Rys. 10.



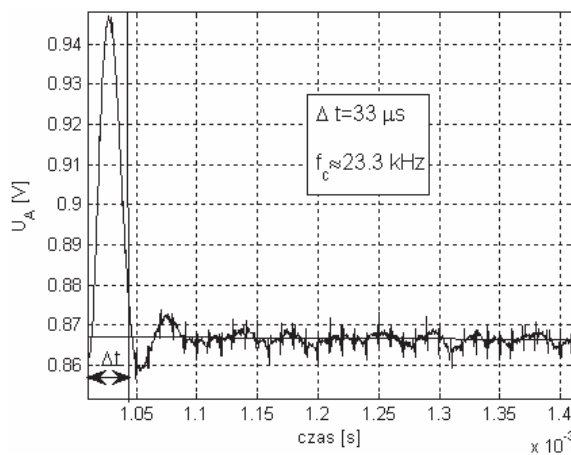
Rys. 11.

dobierany jest w zależności nie tylko dla rezystancji włókna pomiarowego ale dla całości rezystancji wraz z kablami doprowadzającymi. Na skutek tego przy relatywnie małym współczynniku nagrzania z punktu widzenia całości rezystancji, włókno podgrzewane jest do znacznie wyższych temperatur niż mogłoby to wynikać z wartości dobranego współczynnika, co może prowadzić do jego przegrzania. Możliwość zmierzenia rezystancji doprowadzeń daje szansę na wprowadzenie metod korekcji współczynnika nagrzania, tak by jego wartość dobierana była tylko i wyłącznie w stosunku do włókna pomiarowego.

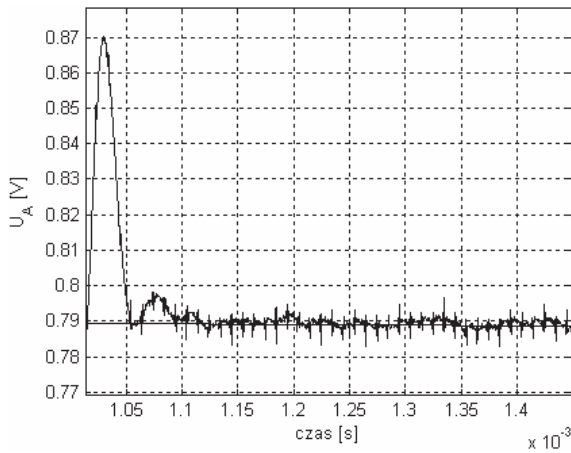
#### 4.3. Wpływ prędkości przepływu na pasmo przenoszenia termooanemometru

Analiza wpływu prędkości na pasmo przenoszenia termooanemometru była przedmiotem wielu badań. Najnowsze rozwiązania termooanemometrycznych systemów pomiarowych [7] pozwalają uniezależnić się od wpływu zmiennej prędkości na dynamikę pomiaru zachowując stałe pasmo przenoszenia anemometru niezależnie od zmieniającej się wartości prędkości.

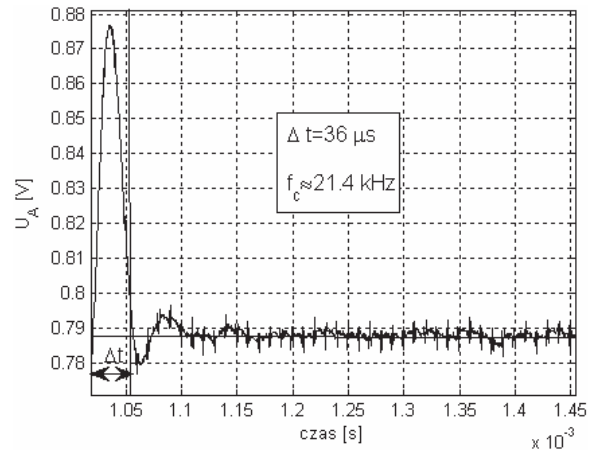
Przy wykorzystaniu nowego, analizowanego rozwiązania anemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych dokonano badania wpływu zmian prędkości przepływu na odpowiedź dynamiczną urządzenia. Badania wykonano w tunelu aerodynamicznym z wykorzystaniem sondy pomiarowej z włóknem o średnicy 5  $\mu\text{m}$ . Dla ustalonych nastaw regulacyjnych, dobranych tak aby dynamiczna odpowiedź termooanemometru była optymalna dla przepływu o prędkości 10 m/s (rysunek 12) analizowano odpowiedzi układu przy malejących prędkościach. Z uwagi na uzyskane charakterystyki dynamiczne układu odbiegające od idealnej charakterystyki przedstawionej na rysunku 1, można było na podstawie odpowiedzi układu jedynie oszacować zmiany pasma przenoszenia systemu termooanemometrycznego. Na rysunkach 13 i 15 przedstawiono takie przykładowe odpowiedzi dynamiczne układu dla dwóch wybranych prędkości 5 m/s



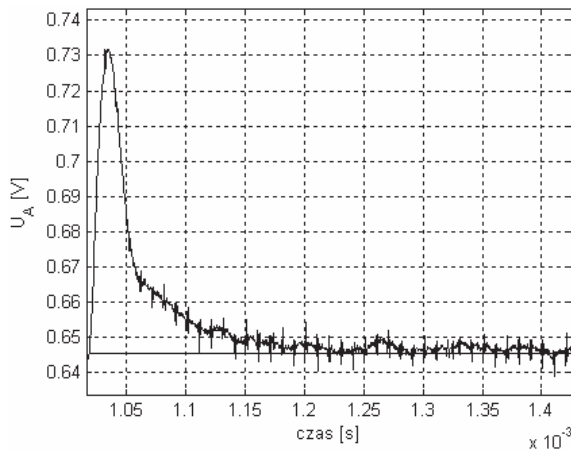
Rys. 12.



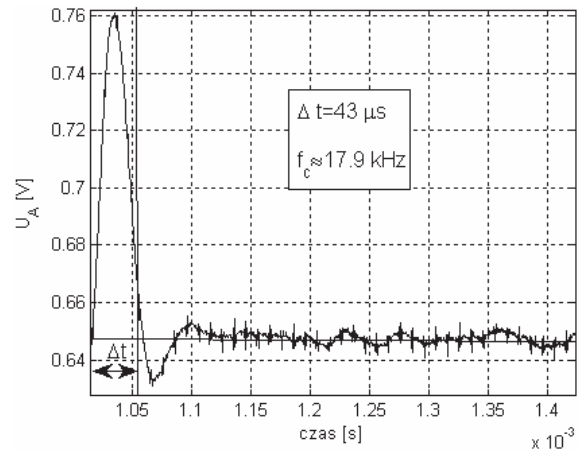
Rys. 13.



Rys. 14.



Rys. 15.



Rys. 16.

i 1 m/s. Wraz ze zmianą prędkości pasmo przenoszenia termooanemometru znacząco się zmniejsza. Szacowana jego wartość w przypadku przepływu przy braku optymalizacji można oszacować w granicach 10 kHz dla przepływu 5 m/s oraz 4 kHz dla 1 m/s.. Dokonując optymalizacji pasma przenoszenia anemometru dla tych samych prędkości przepływu uzyskano częstotliwości graniczne o wartościach 21.4 kHz oraz 17.9 kHz

## 5. Zakończenie

Warunki pracy termooanemometrów często odbiegają od warunków w których były one wzorcowane i dla których dobór odpowiednich parametrów zapewnia optymalną dynamikę ich pracy. Rodzi to konieczność tworzenia nowych rozwiązań konstrukcyjnych i stosowania procedur, które pozwolą dokonywać optymalizacji pasma przenoszenia takich systemów pomiarowych. Koncepcja takiego anemometru z potencjometryczną regulacją właściwości dynamicznych została przedstawiona w niniejszym artykule. Wykazano w nim dużą wrażliwość układów termooanemometrycznych na różne konfiguracje ich pracy i zmiany warunków pomiarowych. Na bazie przeprowadzonych eksperymentów i zebranych danych, w dalszym etapie prac zostaną opracowane automatyczne procedury korekcyjne dla zaprojektowanego termooanemometru i zaimplementowane w rzeczywistym układzie.

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] Brunn H.H.: *Hot-wire anemometry*, University Press, Oxford 1995.
- [2] Elsner J.W., Drobnik S.: *Metrologia turbulencji przepływów*, wolumen 18 serii Maszyny Przepływowe. Zakład Narodowy im. Ossolinskich, 1995.
- [3] Freymuth P.: *Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers*, Journal of Physics E.: Scientific Instruments, 10:705–710, 1977.
- [4] Jamróz P.: *Wielomianowe modele współczynnika dynamiki czujników temperatury w warunkach zmiennych przepływów*, Przegląd Elektrotechniczny 9/2008.
- [5] Jorgensen Finn E.: *How to measure turbulence with hot-wire anemometers*, Materiały informacyjne Dantec Dynamics, 2002.
- [6] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements*, Measure, 15:1835–1847, 2004.
- [7] Ligęza P.: *Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant-temperature anemometer*, Review Of Scientific Instruments 78, 075104 2007.
- [8] Microchip MCP42010 datasheet.
- [9] Nabilec J. Jamróz P.: *Modele matematyczne czujników do pomiaru zmiennej temperatury gazu przy okresowo zmiennej prędkości*, materiały konferencyjne Kongresu Metrologii, Kraków 2007.

## Hot-wire anemometer with automatic adjustment of dynamic properties

### Abstract

Article presents new construction of hot-wire anemometer, which allows to control dynamic properties of whole measurement system. New solution of hot-wire anemometer makes it possible to control influence on dynamic properties of hot-wire anemometer such parameters as different type of sensor, air velocity, length of signal electric cables etc.

**Keywords:** hot-wire anemometer, dynamic properties of anemometer

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