

# Analiza wpływu właściwości dynamicznych przyrządów pomiarowych na dokładność pomiarów wybranych parametrów środowiska

PAWEŁ JAMRÓZ, KATARZYNA SOCHA, PAWEŁ LIGĘZA, ELŻBIETA POLESZCZYK,  
PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY, MACIEJ BUJALSKI

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

## Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę właściwości dynamicznych termooanemometrów stosowanych jako wzorce dynamiczne w pomiarach niestacjonarnych przepływów prędkości. Na podstawie wybranych termooanemometrycznych czujników do pomiaru prędkości przepływu dokonano analizy generowanego sygnału prędkości przez modul wymuszeń dynamicznych w tunelu aerodynamicznym.

**Słowa kluczowe:** dynamika aparatury pomiarowej, pomiary w przepływach niestacjonarnych

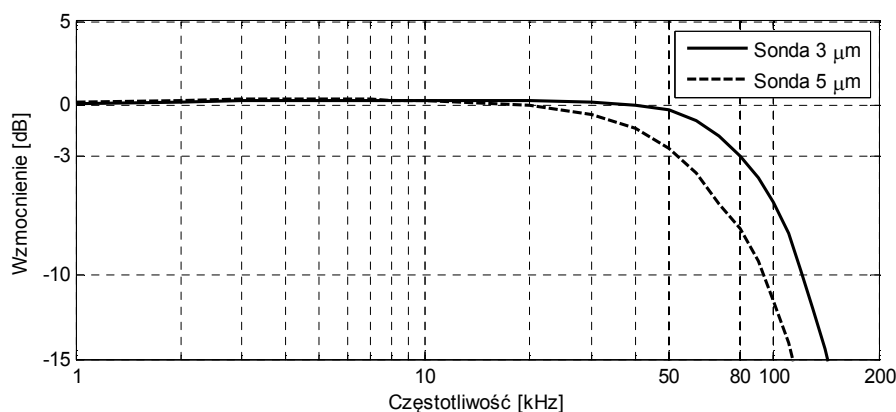
## 1. Wstęp

Systemy i urządzenia pomiarowe opisywane są zwyczajowo zestawem parametrów mówiących o ich zakresach pomiarowych, rozdzielczości, szeroko pojętej dokładności, czy warunkach środowiskowych, w jakich dany przyrząd może funkcjonować. Parametry te często stanowią podstawę wyboru danego urządzenia w określonej aplikacji pomiarowej i niejednokrotnie są one wystarczające, aby taki wybór mógł być dokonany właściwie. Istnieje jednak grupa pomiarów, dla których konieczne staje się uzupełnienie stawianych wymagań dla przyrządów pomiarowych o parametry opisujące ich własności dynamiczne. Grupę tą stanowią pomiary wielkości fizycznych zmiennych w czasie. W przypadku takich pomiarów kluczowe staje się pytanie czy dane urządzenie pomiarowe nadąży za zmianami sygnału mierzonego i jaki wpływ na wynik pomiaru posiadać będzie mała inercja wykorzystywanego czujnika. Ma to szczególne znaczenie w poszukiwaniach i badaniach wzorców wymuszeń dynamicznych dla różnych wielkości fizycznych. Problem wykorzystania włóknowego czujnika termooanemometrycznego o znikomej inercji jako wzorca w pomiarach niestacjonarnych przepływów o zmiennej prędkości i temperaturze przedstawiony został w [1] i [2]. W przeprowadzonych badaniach wykazano, że pomimo zastosowania włókna o średnicy 3  $\mu\text{m}$  jako wzorca w pomiarze zmiennej temperatury, jej wpływ okazał się na tyle duży, że wyniki pomiarów, mających na celu zbadanie zależności między właściwościami dynamicznymi wolniejszych czujników, wykazywały cechy niejednoznaczności.

W przypadku konieczności kompleksowego określenia cech przepływu związanych z jego prędkością, naturalnym staje się wybór termooanemometrycznej aparatury pomiarowej jako narzędzia pomiarowego. Ma to związek z unikalnymi cechami termooanemometrów wykorzystujących cienkie włókna pomiarowe, pozwalające wykonywać pomiary sygnałów, w których występują składowe o wysokich częstotliwościach. Termooanemometry takie wykorzystano między innymi jako wzorce odniesienia w badaniach metod wyznaczania własności dynamicznych anemometrycznych czujników termistorowych i napylanych wykorzystywanych do pomiaru niskich prędkości [3].

## 2. Wpływ właściwości dynamicznych termooanemometru na wynik pomiaru niestacjonarnej prędkości przepływu

Parametry, związane z własnościami dynamicznymi przyrządów pomiarowych, wykorzystujących sygnał elektryczny jako informację o wartości mierzonej wielkości fizycznej, opisywane są przy pomocy zestawu charakterystyk związanych z ich pasmem przenoszenia. W klasycznej interpretacji pasmo przenoszenia układów obejmuje zakres częstotliwości sygnałów, w którym tłumienie sygnału nie jest większe niż 3 dB. W przypadku termooanemometrów, przyjmuje się, że w zależności od rodzaju urządzenia, grubości włókna, poziomu nagrzania włókna, czy prędkości przepływu pasmo przenoszenia dla sond o średnicy 3  $\mu\text{m}$  oscyluje w okolicach 80 kHz, natomiast dla sond 5  $\mu\text{m}$  50 kHz. Z uwagi na brak możliwości generowania okresowych, szybkozmiennych przepływów w rzeczywistych warunkach, dynamika termooanemometrów wyznaczana jest na podstawie testów częstotliwościowych, w których zaburzenie generowane jest przez generator wpięty w jedną z gałęzi mostka termooanemometru, a częstotliwość graniczna określana jest na podstawie odpowiedzi układu pomiarowego na to zaburzenie [4]. Uzyskanie charakterystyk opisujących dynamiczne własności termooanemometrów z wykorzystaniem zmiennego przepływu możliwe jest na drodze symulacyjnej. W tym celu opracowuje się modele wybranych układów termooanemometrycznych i na ich podstawie przeprowadza badania tak jak to przedstawiono w [5] i [6]. Na podstawie takich modeli możliwe było opracowanie charakterystyki amplitudowo częstotliwościowej dla sondy 3 i 5  $\mu\text{m}$  przy prędkości średniej przepływu 5 m/s. Wynik symulacji przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Pasmo przenoszenia termooanemometru

Wyznaczone pasma przenoszenia dla poszczególnych sond pomiarowych odpowiadają wartościom opisywanym przez producentów różnych układów termooanemometrycznych. Należy jednak pamiętać, że każdy układ tego typu musi być rozpatrywany indywidualnie, z uwagi na silną zależność własności dynamicznych od indywidualnych nastaw i parametrów elektronicznych całego systemu, a nie jedynie sondy pomiarowej.

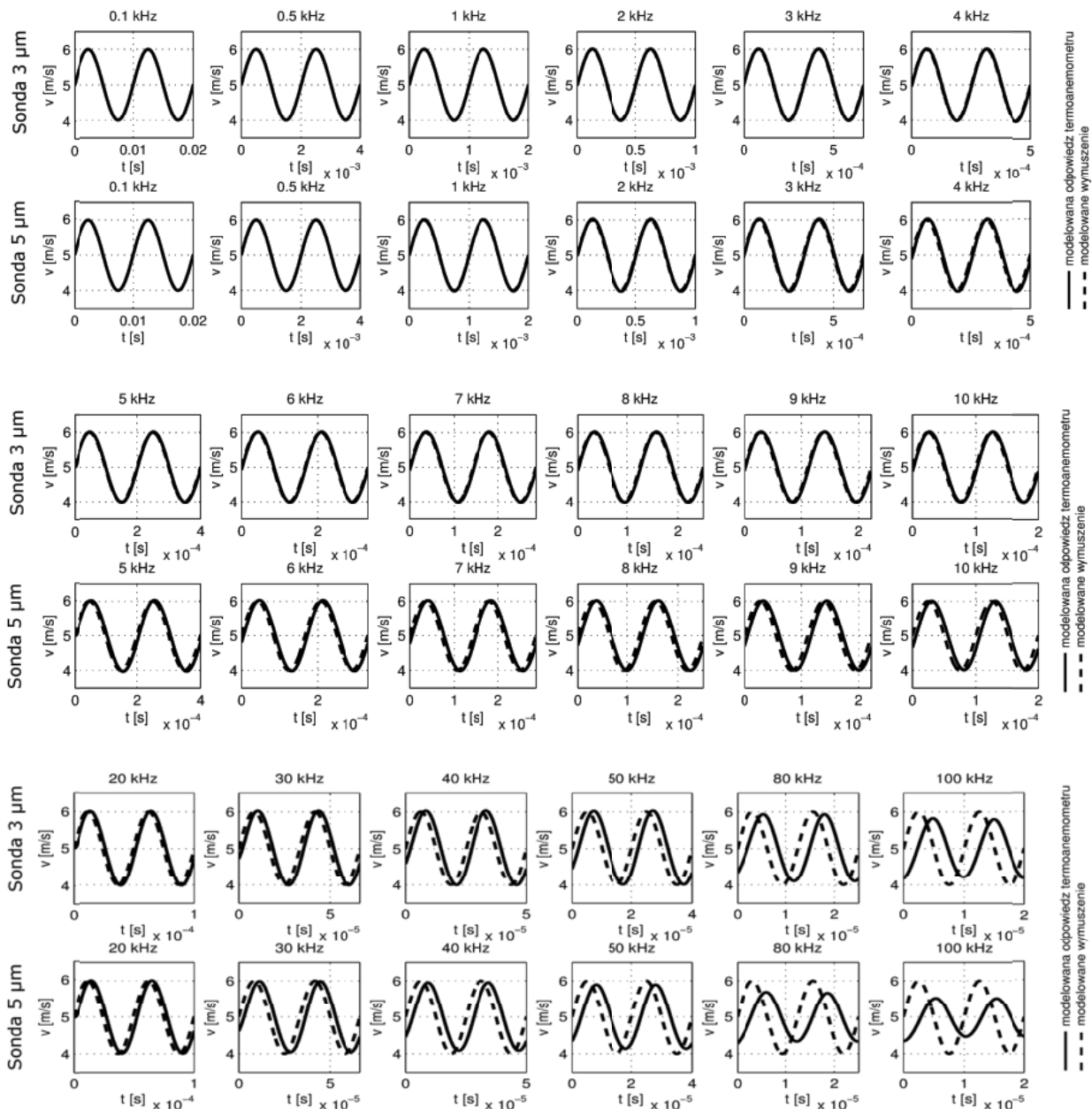
W przypadku pomiarów mających na celu określenie własności wzorcowych wymuszeń dynamicznych użyteczniejsza do analizy jest postać umożliwiająca określenie chwilowych wartości błędów dynamicznych powstających przy sygnałach zawierających składowe różnych częstotliwości. Na rysunku 2 przedstawiono odpowiedź modelu termooanemometru na dynamiczne wymuszenie sinusoidalne o częstotliwościach od 0,1 do 100 kHz. Prezentacja taka pozwala zobaczyć różnice między chwilowymi wartościami sygnału wymuszenia, a odpowiedzią modelowanego termooanemometru.

W analizowanym przypadku dla sondy 3  $\mu\text{m}$  do częstotliwości 7 kHz oraz 4 kHz dla sondy 5  $\mu\text{m}$ , sygnał wymuszenia i odpowiedzi pokrywają się, po czym wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału wymuszenia różnice pomiędzy nimi stają się coraz bardziej widoczne. W celu dokładnego określenia tych różnic wprowadzono kryterium maksymalnego błędu dynamicznego  $\Delta_{\text{max}}$  wyznaczonego z zależności (1).

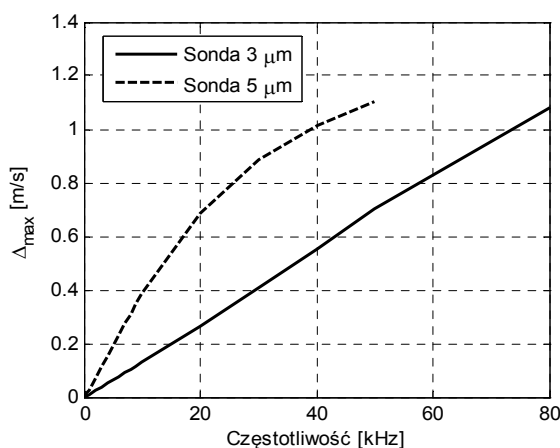
$$\Delta_{\text{max}} = \max |v_m(i) - v_t(i)| \quad (1)$$

gdzie:

- $v_m(i)$  – kolejne ( $i$ -te) próbki modelowanej prędkości przepływu,
- $v_t(i)$  – kolejne ( $i$ -te) próbki modelowanej odpowiedzi termooanemometru.



Rys. 2. Odpowiedź modelu termooptomieru na dynamiczne wymuszenie sinusoidalne



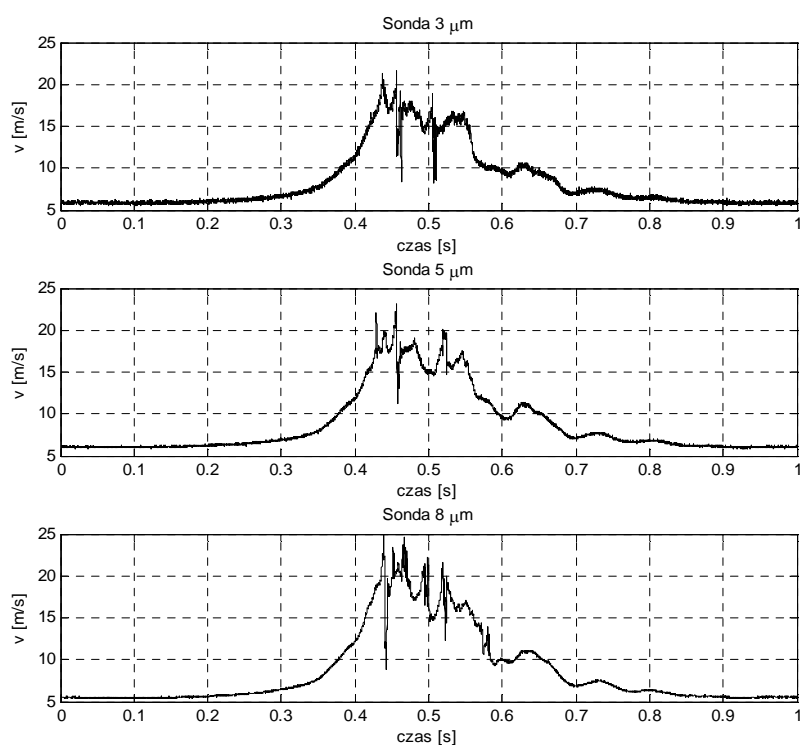
Rys. 3. Maksymalny błąd dynamiczny pomiaru termooptomierem w funkcji częstotliwości wymuszenia

Błąd ten został przedstawiony na rysunku 3.

Obraz ilościowy uzyskanego wyniku symulacyjnego pokazuje, że pomimo pozornej zgodności sygnału wymuszenia i odpowiedzi w zakresie niskich częstotliwości istnieją pewne różnice między tymi sygnałami zarówno dla sondy 5 μm, jak i dla sondy szybszej o średnicy włókna 3 μm. O różnicach tych należy pamiętać podczas analizowania wyników pomiarów z użyciem termooptometrycznych sond włóknowych jako wzorców prędkości w pomiarach niestacjonarnych przepływów.

### 3. Termoanemometr jako wzorzec prędkości dla wymuszeń dynamicznych

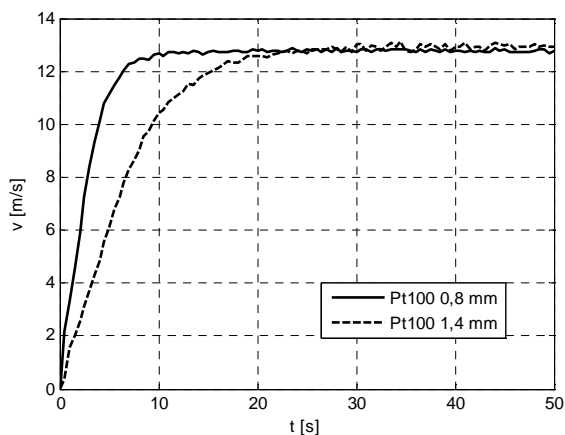
Problematyka pomiarów z uwzględnieniem własności dynamicznych przyrządów pomiarowych i ich wpływu na wyniki pomiarów, stanowi aktualne zagadnienie poruszane w trakcie prowadzenia badań nad opracowywaną i wykorzystywaną aparaturą w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN. Dotyczy to w szczególności aparatury związanej z pomiarem prędkości przepływu, tj. termoanemometrów oraz anemometrów skrzydełkowych [7]. W roku 2013 Instytut Mechaniki Górotworu PAN zakupił nowe narzędzie do badań aparatury pomiarowej w postaci nowoczesnego tunelu aerodynamicznego wyposażonego w moduł generowania przepływów zmiennych w czasie [8]. Zadaniem tego modułu jest generowanie zaburzenia prędkości przepływu w sposób zbliżony do sinusoidalnego o częstotliwości nie mniejszej niż 1 Hz. Moduł ten w przyszłości ma posłużyć jako wzorcowe wymuszenie niestacjonarnego przepływu o zmiennej prędkości, na podstawie którego możliwe będzie badanie właściwości dynamicznych różnego rodzaju aparatury do pomiaru prędkości przepływu. Aby jednak moduł ten mógł być wykorzystany jako wzorzec wymuszeń dynamicznych koniecznym jest jego przebadanie i dokładne określenie rodzaju generowanego przez niego zmiennego przepływu. Z przeprowadzonej w rozdziale 2 analizy wynika, że dla generowanych częstotliwości sygnału prędkości w zakresie 1 Hz, możliwe jest wykorzystanie dowolnego włókna termoanemometrycznego spełniającego rolę dynamicznego wzorca pomiarowego. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe rejestracje pojedynczych okresów wymuszenia dynamicznego generowanego w tunelu, które zostały zarejestrowane przez sondy z włóknami o średnicach 3, 5 i 8  $\mu\text{m}$  z częstotliwością 20 kHz.



Rys. 4. Sygnał wymuszenia dynamicznego generowanego przez moduł wymuszeń dynamicznych

Analiza uzyskanych wyników pomiarowych wskazuje na duże podobieństwo rejestrowanych wyników przez każdą z sond pomiarowych. Wszystkie zarejestrowały zamiany sygnału o podobnych amplitudach mieszczących się w granicach od 5,5 do 25 m/s. Wszystkie z użytych sond wykazały również silne zaburzenia w prędkości przepływu w przedziałach czasu, w których prędkość ta maleje. Na rysunku widoczne są silne stany dynamiczne począwszy od maksimum aż do wartości odpowiadającej minimum sygnału prędkości.

Wykorzystanie termoanemometrów włóknowych, pomimo ich bardzo dobrych właściwości dynamicznych niejednokrotnie jest niemożliwe z uwagi na ich ograniczoną wytrzymałość mechaniczną i wrażliwość na zmienne warunki pomiarowe. W standardowych pomiarach używane są termoanemometry wykorzystujące termistory półprzewodnikowe, czujniki napyłane oraz termorezystory w osłonach. Właściwości dynamiczne



Rys. 5. Odpowiedź dynamiczna termooanemometrów Pt100 – wymuszenie skokowe

takich czujników uzależnione są od ich kształtów, rozmiarów oraz typów stosowanych osłon. Poznanie własności dynamicznych takich czujników sprowadza się w praktyce do badania każdego z nich z osobna. Jako przykład przeprowadzono badanie termooanemometrycznych sond pomiarowych wykorzystujących platynowe termorezystory Pt100 w osłonie ceramicznej o średnicach 0,8 oraz 1,4 mm. Z uwagi na dużą wytrzymałość, termooanometry takie wykorzystywane są w trudnych warunkach pomiarowych np. w warunkach kopalnianych [9]. W celu analizy dynamiki takich czujników wykonano dwa eksperymenty. W pierwszym z nich na czujniki pomiarowe znajdujące się w stanie równowagi termicznej skierowano strugę powietrza o prędkości 12,5 m/s, symulując wymuszenie skokowe.

Zarejestrowane przebiegi odpowiedzi dynamicznej badanych czujników na wymuszenie skokowe odpowiadają charakterystyce odpowiedzi skokowej obiektów inercyjnych pierwszego rzędu o niejednostkowym wzmocnieniu

$$v(t) = k \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \tag{2}$$

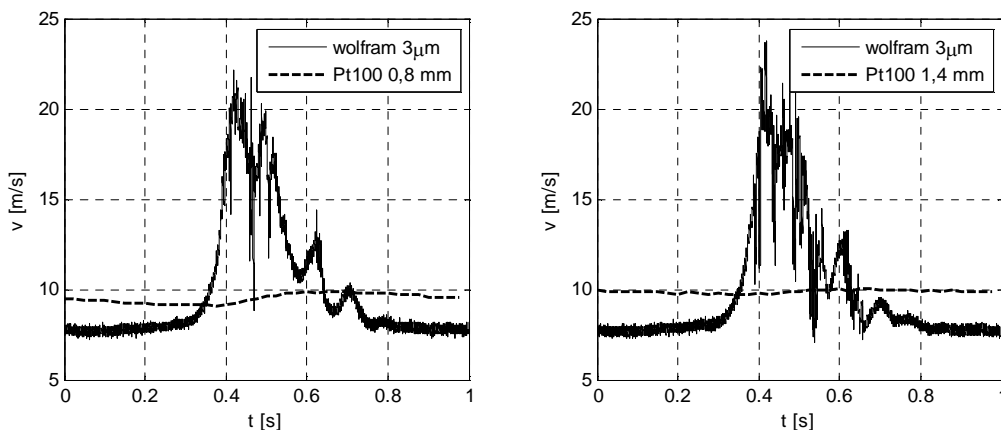
gdzie:

- $v(t)$  – rejestrowana odpowiedź czujnika na wymuszenie skokowe,
- $k$  – współczynnik wzmocnienia,
- $\tau$  – stała czasowa.

Wykorzystując funkcję *fminsearch* w środowisku obliczeń numerycznych MATLAB wyznaczono wartości współczynników wzmocnienia i stałych czasowych, które wynoszą odpowiednio: wzmocnienie  $k = 12,8$ , stała czasowa  $\tau = 2,7$  s dla czujnika o średnicy 0,8 mm oraz  $k = 13,1$ ,  $\tau = 6,9$  s dla czujnika o średnicy 1,4 mm.

W drugim eksperymencie umieszczono badane czujniki w komorze wymuszenia dynamicznego w tunelu aerodynamicznym i rejestrowano ich odpowiedzi na okresowe zmiany prędkości. Równocześnie z badanymi czujnikami umieszczony został wzorcowy czujniki termooanemometryczny rejestrujący chwilowe zmiany prędkości. Zarejestrowane sygnały odpowiedzi badanych czujników przedstawiono na rysunku 6.

Eksperyment wykazał, że wymuszenie w postaci 1 Hz fali realizowanej przez moduł wymuszeń dynamicznych nie może być zastosowane do testowania podobnych układów pomiarowych. Jest ono za szybkie i o zbyt dużym gradiencie prędkości w stanach dynamicznych, w związku z czym odpowiedzi dynamiczne badanych czujników nie nadążały za jego zmianami.



Rys. 6. Odpowiedź dynamiczna termooanemometrów Pt100 – moduł wymuszeń dynamicznych

## 4. Wnioski

Przeprowadzone eksperymenty pomiarowe pokazują potencjalne możliwości wykorzystania modułu wymuszeń dynamicznych do testowania właściwości dynamicznych czujników prędkości przepływu. Aby jednak moduł ten mógł być wykorzystany wymagana jest analiza sygnału przez niego generowanego. W celu wykonywania złożonych badań, związanych z analizowaniem właściwości dynamicznych różnych czujników i systemów do pomiaru prędkości przepływu, konieczna jest też modernizacja stanowiska pomiarowego w celu zapewnienia płynnej regulacji częstotliwości generowanego sygnału w zakresie do 1 Hz.

Praca została wykonana w roku 2014 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- [1] Jamróz P., Nabielec J., *Adaptive sensors for dynamic temperature measurements*. [W:] K. Iniewski (red.), Smart Sensors for Industrial Applications, CRC Pres, 2013.
- [2] Jamróz P., Nabielec J., *Wzorcowanie w pomiarach dynamicznych*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 06, s. 526-528, 2013.
- [3] Melikov A., Popiolek Z., *Comparison of different methods for the determination of dynamic characteristics of low velocity anemometers*. *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, p. 1709-1715, 2004.
- [4] Freymuth P., *Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers*. *Journal of Physics E.: Scientific Instruments*; vol. 10: p. 705-710, 1977.
- [5] Ligęza P., *Układy termoanemometryczne-struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*. vol. 98 from the series „Rozprawy Monografie”. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Cracow, 2001.
- [6] Jamróz P & Ligęza P., Socha K., *Dynamic properties of hot-wire anemometric measurement circuits in the aspect of measurements in mine condition*. *Archives of Mining Sciences*, vol. 57, Issue 3, p. 699-714, 2012.
- [7] Kruczkowski J., *Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym*. Praca doktorska, IMG PAN, 1999.
- [8] Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J. *Tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi*. *Prace IMG PAN*, Tom 15, nr 1-2, 2013.
- [9] Ligęza P., Poleszczyk E. Skotniczny P. *Method and the system of spatial measurement of velocity field of air flow in a mining heading*. *Archives of Mining Sciences*, Vol. 54, no 3, p. 419-440, 2009.

### Impact of the dynamic properties of measuring instruments on the measurement accuracy of selected environmental parameters

#### Abstract

The article presents the analysis of the dynamic properties of the hot-wire sensor utilized as the measurement standard in case of the non-stationary flow condition. The analysis of the flow signal generated by the non-stationary flow generator was realized on the basis of the selected hot-wire anemometer sensors.

**Keywords:** dynamic properties of the hot-wire sensors, non-stationary flow