

Eksperymentalna weryfikacja wielokanałowego termooanemometrycznego systemu pomiarowego jako anemometru z falą cieplną

JAN KIELBASA, PAWEŁ LIGĘZA, ELŻBIETA POLESZCZYK, ANDRZEJ RACHALSKI

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

Streszczenie

Opracowano laboratoryjny komputerowy system pomiarowy o szerokich możliwościach metrologicznych dający się łatwo adaptować do wymagań konkretnego problemu metrologicznego. System składa się z czujników pomiarowych, czterokanałowego sterowanego układu stałoprądowo-stałowtemperaturowego, kart szybkich przetworników analogowo-cyfrowych z pamięcią oraz komputera PC z oprogramowaniem. W ramach realizowanych prac przeprowadzono eksperymentalną weryfikację i optymalizację systemu pomiarowego. Badania prowadzono na stanowisku pomiarowym składającym się ze sterowanego tunelu aerodynamicznego pracującego w zakresie małych prędkości przepływu oraz badanego systemu pomiarowego realizującego metodę anemometru z falą cieplną. Przedstawiono wyniki pomiarów uzyskanych dla różnych kształtów, częstotliwości i amplitud fali cieplnej.

Słowa kluczowe: metrologia, termooanemometria, system pomiarowy, anemometr falowy

1. Wprowadzenie

Obszarem zainteresowań Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górotworu PAN są metody pomiaru prędkości przepływu płynów ze szczególnym uwzględnieniem metod cieplnych. Opracowano tu wiele nowych metod pomiarowych, prowadzono prace nad poszerzeniem zakresu możliwości metrologicznych metod klasycznych, rozwijano technologię konstrukcji czujników. Równolegle z prowadzoną działalnością naukowo-badawczą trwały prace zmierzające do zastosowania opracowanych metod w przyrządach pomiarowych. Powstało wiele konstrukcji aparatury pomiarowej pracującej w oparciu o nowe koncepcje metrologiczne. Przyrządy pomiarowe powstawały zarówno jako modele jednostkowe opracowane dla potrzeb konkretnego, specjalistycznego zagadnienia metrologicznego, jak również budowano niewielkie serie przyrządów o bardziej uniwersalnym zastosowaniu. Opracowana i wykonana aparatura pomiarowa znalazła zastosowanie w badaniach laboratoryjnych i przemysłowych.

Dotychczasowe rozwiązania przyrządów pomiarowych oparte były o zbliżoną koncepcję struktury zestawu pomiarowego. Zestaw taki składał się z kompletu wymiennych czujników o jednakowej konstrukcji, osiadki czujnika stanowiącej jego złącze elektryczne i uchwyt mechaniczny oraz specjalizowanego, analogowego lub analogowo-cyfrowego układu elektronicznego realizującego zadany algorytm pomiarowy. Cechą charakterystyczną tego rozwiązania był stały i stosunkowo wąski zakres możliwości metrologicznych zestawu. Zmiana wymagań metrologicznych, realizacja innego algorytmu pomiarowego czy próba zastosowania nowej metody wymagały w zasadzie opracowania i budowy nowego zestawu pomiarowego. Taki stan rzeczy, a także coraz częściej występujące zapotrzebowanie na specjalizowaną aparaturę pomiarową do bardzo zróżnicowanych zagadnień metrologii przepływów skłoniły zespół do opracowania laboratoryjnego komputerowego systemu pomiarowego o możliwie szerokich możliwościach metrologicznych dającego się łatwo adaptować do wymagań konkretnego problemu metrologicznego.

System ten składa się z czujników pomiarowych, czterokanałowego sterowanego układu stałoprądowo-stałowtemperaturowego, kart szybkich przetworników analogowo-cyfrowych z pamięcią oraz komputera PC z oprogramowaniem. Algorytm pracy systemu determinowany jest przez program. Można wyróżnić oprogramowanie podstawowe, związane ze sterowaniem pracą układu stałoprądowo-stałowtemperaturowego, komunikacją układu z komputerem, obsługą przetworników analogowo-cyfrowych i układów sterujących, oraz oprogramowanie specjalizowane realizujące wybrane algorytmy pomiarowe oraz algorytmy akwizycji, przetwarzania i wizualizacji danych. Oprogramowanie specjalizowane, opracowywane indywidualnie do danego zagadnienia badawczego jest wykorzystywane w procesie wzorcowania czujników oraz podczas prowadzenia badań na stanowisku pomiarowym.

W ramach realizowanych prac przeprowadzono eksperymentalną weryfikację i optymalizację systemu pomiarowego. Badania prowadzono na stanowisku pomiarowym składającym się ze sterowanego tunelu aerodynamicznego pracującego w zakresie małych prędkości przepływu oraz badanego systemu pomiarowego realizującego metodę anemometru z falą cieplną. Przedstawiono wyniki pomiarów uzyskanych dla różnych kształtów, częstotliwości i amplitud fali cieplnej. Rezultatem prowadzonych prac jest system pomiarowy o szerokim obszarze aplikacyjnym. Przewiduje się możliwość zastosowania systemu w specjalizowanych zagadnieniach badawczych w warunkach laboratoryjnych, a także w wybranych zastosowaniach technicznych i przemysłowych. Innym potencjalnym obszarem zastosowań systemu jest proces dydaktyczny w zakresie metrologii przepływów.

2. Sterowany układ stałowtemperaturowy

Rezystancyjne przetworniki temperatury stanowią klasę przetworników pomiarowych, w których wykorzystano zależność rezystancji elementu czynnego od temperatury. Znajdują zastosowanie nie tylko do pomiaru temperatury jako termometry rezystancyjne, ale także do pomiaru takich wielkości fizycznych jak prędkość przepływu płynów, skład chemiczny i stężenie gazów, ciśnienie w gazach rozrzedzonych, a także w badaniach kalorymetrycznych oraz bolometrach.

Ważną grupę stanowią tu czujniki, w których elementem czynnym jest drut o średnicy pojedynczych mikrometrów lub cienka folia. Czujniki te znane pod nazwą czujników z zimnym/grzanym drutem (folią) posiadają unikatowe właściwości. Najważniejsze z nich to możliwość pomiaru sygnałów szybkozmiennych, pomiar zbliżony do punktowego, znikoma inwazyjność pomiaru, brak elementów ruchomych i elektryczny sygnał wyjściowy. Jednym z podstawowych zastosowań tych czujników jest anemometria – badania pól prędkości oraz temperatury w przepływach płynów [1]. O jakości pomiarów anemometrycznych decyduje wybór metody pomiarowej, czujnik anemometryczny oraz układ jego zasilania.

Obecnie stosuje się dwa podstawowe sposoby zasilania czujników: układ stałoprądowy CCA oraz układ stałowtemperaturowy CTA. Układ stałoprądowy, w którym czujnik zasilany jest prądem o stałej wartości, stosowany jest najczęściej do pomiarów termometrycznych, oraz rzadziej do pomiarów anemometrycznych. Układ stałowtemperaturowy, w którym czujnik zasilany jest w taki sposób, aby temperatura nagrzanego czujnika była utrzymywana niezależnie od zewnętrznych warunków odbierania ciepła na stałym poziomie, jest podstawowym układem anemometrycznym. Posiada on doskonale właściwości statyczne i dynamiczne oraz dobry stosunek sygnału do szumu. Klasycznie układ stałowtemperaturowy realizuje się poprzez umieszczenie czujnika w niezrównoważonym mostku rezystancyjnym, który następnie jest równoważony poprzez zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego.

Opracowano [2] inny typ układu stałowtemperaturowego nie zawierający mostka rezystancyjnego, w którym czujnik zasilany jest linią czteroprzewodową o rozdzielonych doprowadzeniach prądowych i napięciowych. Pozwala to na eliminację wpływu rezystancji doprowadzeń czujnika na pracę układu i prowadzenie precyzyjnych pomiarów szczególnie dla małych rezystancji, długich doprowadzeń i małych współczynników nagrzania czujnika. Wprowadzenie do tego układu możliwości sterowania zewnętrznym sygnałem cyfrowym oraz połączenie z układem stałoprądowym w układzie źródła prądowego prowadzi do powstania nowego, uniwersalnego układu zasilania czujników anemometrycznych. Układ ten został nazwany sterowanym układem stałowtemperaturowym [2]. Sterowany układ stałowtemperaturowy stanowi system zasilania rezystancyjnego czujnika pomiarowego umożliwiający wybór i realizację dwóch funkcji: stałoprądowej lub stałowtemperaturowej. Wartość rezystancji czujnika zadawana jest sygnałem cyfrowym. Układ przeznaczony jest do laboratoryjnych prac badawczych w dziedzinie anemometrii. Umożliwia on realizację wielu funkcji i metod pomiarowych [3], z których wymienić można:

- pomiary termometryczne w układzie stałoprądowym,
- pomiary anemometryczne w układzie stałotemperaturowym,
- pomiary w układzie anemometru ze zmiennym w czasie nagraniem czujnika,
- generacja i detekcja fal temperaturowych w przepływach,
- złożone metody i algorytmy pomiarowe,
- badanie charakterystyk prądowo-napięciowych czujników anemometrycznych.

Układ ten zastosowano w konstrukcji komputerowego wielokanałowego termooanemometrycznego systemu pomiarowego.

3. Komputerowy system pomiarowy

Ze względu na przyjęte rozwiązania konstrukcyjne i zastosowaną technologię realizacji termooanemometryczną aparaturę pomiarową można podzielić na następujące klasy:

- przyrządy analogowe,
- przyrządy zintegrowane z czujnikiem,
- przyrządy analogowo-cyfrowe,
- przyrządy analogowo-cyfrowe z wyjściem do PC,
- przyrządy mikroprocesorowe z wyjściem do PC,
- specjalizowane karty komputerowe,
- specjalizowane systemy komputerowe.

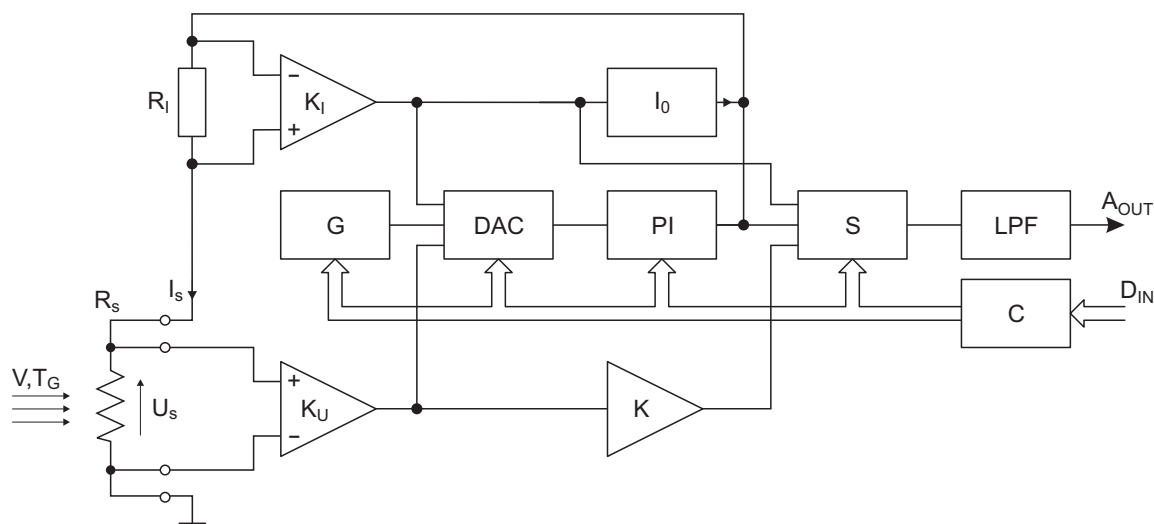
Prezentowany system pomiarowy zalicza się do tej ostatniej klasy. System taki składa się z czujników pomiarowych, termo anemometrycznych układów przetwarzania, kart przetworników analogowo-cyfrowych oraz komputera PC wraz z oprogramowaniem. Podczas projektowania systemu pomiarowego przyjęto następujące założenia konstrukcyjne:

- możliwie szeroki obszar aplikacyjny układu,
- cztery identyczne kanały pomiarowe,
- pomiar prędkości i temperatury w każdym kanale,
- sterowanie funkcjami układu z komputera PC,
- możliwość realizacji złożonych algorytmów pomiarowych,
- pomiar parametrów czujnika i funkcje testujące,
- zabezpieczenie czujnika pomiarowego w stanach przejściowych.

Zaprojektowany i zrealizowany system pomiarowy posiada cztery identyczne kanały. Schemat blokowy pojedynczego kanału pomiarowego przedstawia rysunek 1. Podstawowym elementem każdego kanału pomiarowego jest sterowany cyfrowo bezmostkowy układ stałotemperaturowy. Układ ten zbudowany jest ze wzmacniaczy pomiaru prądu K_I i napięcia K_U czujnika, przetwornika cyfrowo-analogowego DAC oraz sterowanego regulatora PI. Elementem pozwalającym na zadanie dowolnego z przyjętego zakresu współczynnika nagrzania włókna pomiarowego jest programowany przetwornik DAC. Dodatkowo pełni on funkcję węzła sumacyjnego sygnału prądowego i napięciowego. Sygnałem wyjściowym z układu może być napięcie proporcjonalne do prądu czujnika, napięcie na czujniku wzmocnione we wzmacniaczu K , lub napięcie wyjściowe regulatora PI. Wybór źródła sygnału realizuje sterowany multiplekser analogowy S . Wybrany wyjściowy sygnał analogowy po przejściu przez antyaliasingowy filtr dolnoprzepustowy LPF jest dostępny na wyjściu analogowym A_{OUT} . Cyfrowy sygnał wejściowy D_{IN} poprzez układ sterujący C umożliwia programowanie przetwornika DAC, multipleksa S i załączanie układu stałotemperaturowego poprzez załączenie regulatora PI, a także włączanie generatora testu częstotliwościowego G . Dodatkowy układ to źródło prądowe I_0 umożliwiające stałoprądową pracę czujnika przy wyłączonej funkcji stałotemperaturowej. Pozwala to na pomiar rezystancji nie nagrzanego czujnika oraz pracę kanału w trybie pomiaru temperatury.

Układ posiada również funkcję zabezpieczenia czujnika przed przepaleniem w stanach przejściowych i awaryjnych.

Prezentowany układ został zrealizowany w technice analogowo-cyfrowej, umieszczony jest w metalowej obudowie ekranującej zawierającej złącza czujników, złącze cyfrowych sygnałów sterowania oraz złącze zewnętrznego zasilania. Zrezygnowano z wewnętrznego zasilacza ze względu na minimalizację zakłóceń. Układ zmontowano na opracowanej komputerowo płycie z opisami elementów.



Rys. 1. Pojedynczy kanał programowanego układu pomiarowego

Sterowanie pracą układu za pomocą sygnału cyfrowego umożliwia realizację następujących funkcji podstawowych:

- Zadanie poziomu nagrzania czujnika w kanałach 1 do 4 poprzez zapisanie dwunastobitowej liczby binarnej do przetwornika cyfrowo-analogowego układu stałotemperaturowego.
- Programowy pomiar rezystancji czujnika w kanałach 1 do 4. Pomiar ten dokonywany jest poprzez iteracyjne zadawanie poziomów nagrzania czujnika i odczyt stanu układu komparacji rezystancji, który umożliwi porównanie wartości rezystancji czujnika i rezystancji zadanej.
- Wybór trybu pracy torów pomiarowych w kanałach 1 do 4. Tory pomiarowe mogą realizować funkcję stałoprądowego termometru rezystancyjnego lub termoanemometru stałotemperaturowego pracującego z zadanym poziomem nagrzania czujnika.
- Włączenie testu częstotliwościowego termoanemometrów jednocześnie w kanałach 1 do 4. Test ten umożliwia regulację parametrów dynamicznych układów stałotemperaturowych.

Jednym z możliwych zastosowań prezentowanego systemu pomiarowego jest realizacja anemometru z falą cieplną. Anemometr taki znajduje zastosowanie w precyzyjnych, wzorcowych pomiarach prędkości przepływu gazów w zakresie małych prędkości. W systemie pomiarowym zastosowano czujnik termoanemometryczny trójwłóknowy, o włóknach równoległych i leżących w jednej płaszczyźnie. Pierwsze włókno pełni funkcję nadajnika fali cieplnej, natomiast dwa pozostałe są detektorami. Idea pomiaru polega na generowaniu fali cieplnej o zadanych parametrach i pomiarze prędkości przepływu poprzez pomiar przesunięcia fazowego sygnałów na detektorach.

Nadajnik fali cieplnej współpracuje z pierwszym kanałem systemu pomiarowego. Kanał ten realizuje funkcję sterowanego układu stałotemperaturowego i umożliwia wymuszenie na nadajniku periodycznych zmian temperatury o zadanym kształcie, amplitudzie i częstotliwości.

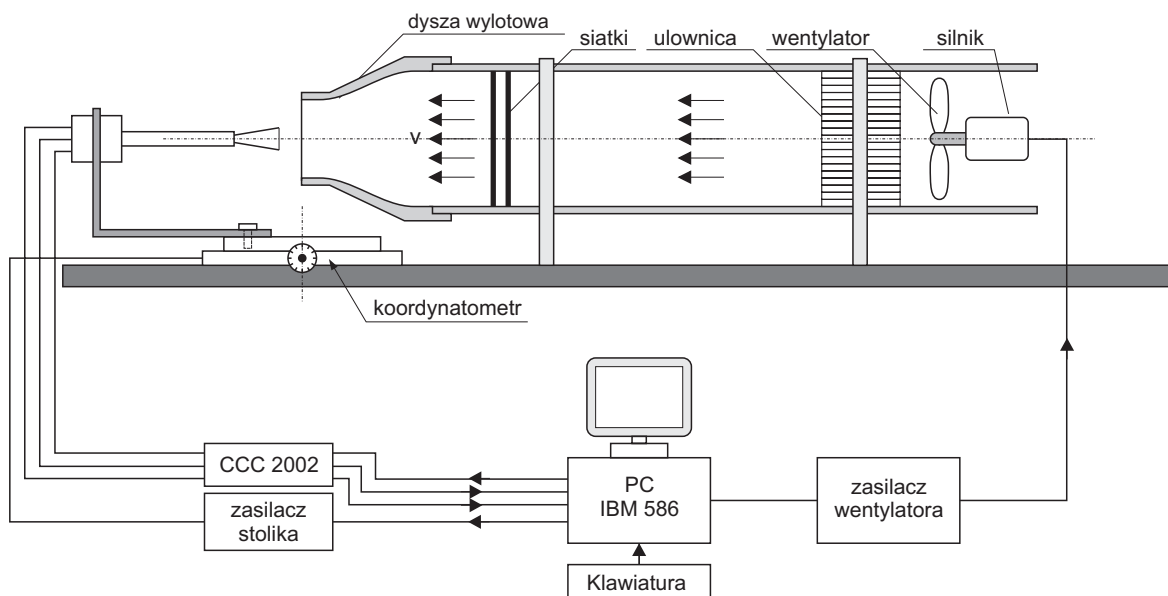
Zadanie parametrów przebiegu odbywa się na drodze programowej. Detektory fali cieplnej podłączone są do drugiego i trzeciego kanału systemu pomiarowego. Kanały te realizują funkcję stałoprądową, a więc pracują w trybie pomiaru temperatury. Przebiegi sygnału temperatury na detektorach są w procesie pomiarowym rejestrowane w systemie pomiarowym, a następnie obliczane są dla nich współczynniki szeregu Fouriera. Na podstawie przesunięcia fazowego pierwszych harmonicznym sygnału, przy znajomości częstotliwości fali cieplnej i odległości detektorów wyznaczana jest prędkość przepływu medium.

4. Stanowisko pomiarowe

Eksperymenty mające na celu doświadczalną weryfikację wielokanałowego termoanemometrycznego systemu pomiarowego jako anemometru z falą cieplną były prowadzone na stanowisku pomiarowym [4]

przedstawionym na rysunku 2. Stanowisko to umożliwia wytworzenie i kontrolowanie odpowiednich warunków metrologicznych przepływu oraz pozwala na zbadanie charakterystyk czujnika przy różnych jego położeniach w stosunku do kierunku prędkości.

Specjalne oprzyrządowanie daje możliwość stosowania różnorodnych uchwytów i urządzeń koordynatometrycznych nadających stanowisku charakter uniwersalny.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi:

- tunel aerodynamiczny,
- ulownica i system siatek wyrównujących przepływ (wyposażenie tunelu),
- wentylator z napędem,
- koordynatometr obrotowy,
- koordynatometr x-y,
- rotor sterowany komputerowo przez sterownik obrotów,
- sterowany komputerowo czterokanałowy system termooanemometryczny CCC'2002,
- układ sterujący, złożony z komputera PC 586 wyposażonego w karty przetwornikowe oraz uniwersalne oprogramowanie,)
- zestaw sond pojedynczych i wielowłóknowych wraz z odpowiednimi uchwytami.

Kanał przepływowy tunelu tworzy rura metapleksowa o średnicy 110 mm i długości ok. 1600 mm. Podstawę, do której przymocowany jest tunel, a także koordynatometr, stanowi konstrukcja z aluminiowych kształtowników, posadowiona na gumowych podkładkach amortyzujących drgania. Wewnątrz kanału zamontowano ulownicę, wykonaną w formie zwartej paczki cienkich rurek metapleksowych i system odpowiednio dobranych siatek, które mają za zadanie wyrównanie przepływu. Wylot tunelu jest zaopatrzony w dyszę wylotową o średnicy około 70 mm. Tunel został wywzorcowany przy pomocy rurki spiętrzeniowej Pitota-Prandtla i metodą fal cieplnych w zakresie małych prędkości (0-5 m/s). Uzyskano zależność prędkości przepływu powietrza od obrotów wentylatora. Przy pomocy precyzyjnego termooanemometru HPA'98 [5] zbadano w kanale pomiarowym profile poprzeczne prędkości, aby stwierdzić, że w jego obszarze jest płaskie pole prędkości z niepewnością mniejszą niż 1%. Urządzenie wytwarzające przepływ w tunelu zostało wykonane specjalnie do obsługi eksperymentów, które wymagają utrzymywania przez długi czas stabilnych parametrów przepływu. Napęd jest skonstruowany w oparciu o wentylator napędzany silnikiem trójfazowym. Silnik jest sterowany z falownika typu SJ100 007NFE firmy Hitachi. Realizuje on zasilanie wentylatora prądem zmiennym o częstotliwości 0.5-50 Hz, co pozwala na uzyskanie prędkości obrotowej wentylatora

od 30 do 3000 obrotów na minutę. Tak zbudowany napęd daje możliwość wytworzenia prędkości przepływu w zakresie od 0 do 35 m/s. Czujnik pomiarowy umieszcza się u wylotu kanału przepływowego i jest on opływany przez strumień wydmuchiwany z tunelu.

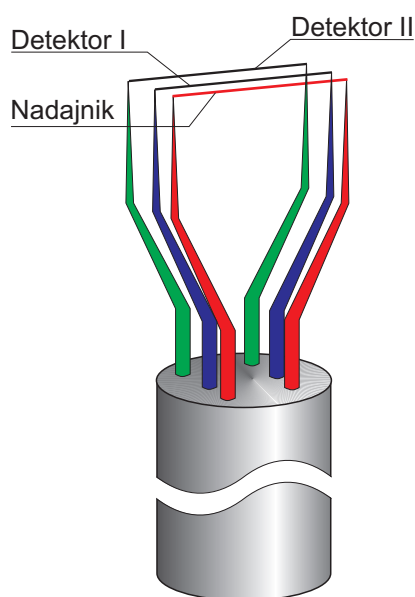
4.1. Czujnik pomiarowy

Pomiar prędkości przepływu metodą fal cieplnych wymaga zastosowania wielowłóknowego czujnika termooanemometrycznego. Baza pomiarowa czujnika składa się z trzech współpłaszczyznowych, równoległych elementów czynnych, wykonanych z platynowanego powierzchniowo drutu wolframowego o średnicy 5 μm . Drut ten w porównaniu z drutem wolframowym nieplatynowanym posiada korzystniejsze właściwości metrologiczne w zastosowaniu do czujników, gdzie wymagana jest większa długość elementu czynnego:

- mniejszą rezystancję na jednostkę długości
- wyższą możliwą temperaturę pracy – wyższa wartość współczynnika temperaturowego, która wynosi $3.5 \div 4.0 \times 10^{-3}$ („goły” wolfram $3.2 \div 3.5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

Wymienione parametry pozwalają na stosowanie odpowiednich dla metody pomiarowej współczynników nagrzania, najczęściej do wartości $N = 1.8$. Mniejsza rezystancja jednostkowa daje możliwość wykonania włókna o żądanej długości, którego prąd zasilania mieści się w granicach narzuconych przez układ elektroniczny.

Zastosowany w pełniącym rolę anemometru z falą cieplną systemie pomiarowym czujnik przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Czujnik pomiarowy

Trójwłóknowa sonda do pomiaru prędkości przepływu metodą fal cieplnych umieszczona jest sztywno na wylocie z tunelu w ten sposób, że płaszczyzna, którą tworzą włókna jest prostopadła do płaszczyzny przekroju poprzecznego tunelu. Licząc od strony zewnętrznej: jako pierwsze usytuowane w przepływie jest włókno zwane nadajnikiem, które jest źródłem generowanej fali cieplnej. Parametry charakteryzujące falę, czyli jej kształt, amplituda, częstotliwość, ilość okresów są zadawane programowo i realizowane przez termooanemometr CCC'2002. Kolejne włókno – detektor I oraz trzecie – detektor II są rozmieszczone równoległe do nadajnika w obszarze jego śladu cieplnego i pracują jako termometry. Włókna nadajnika i dwu detektorów są podłączone do kolejnych kanałów pomiarowych przyrządu oddzielnie, ekranowanymi przewodami.

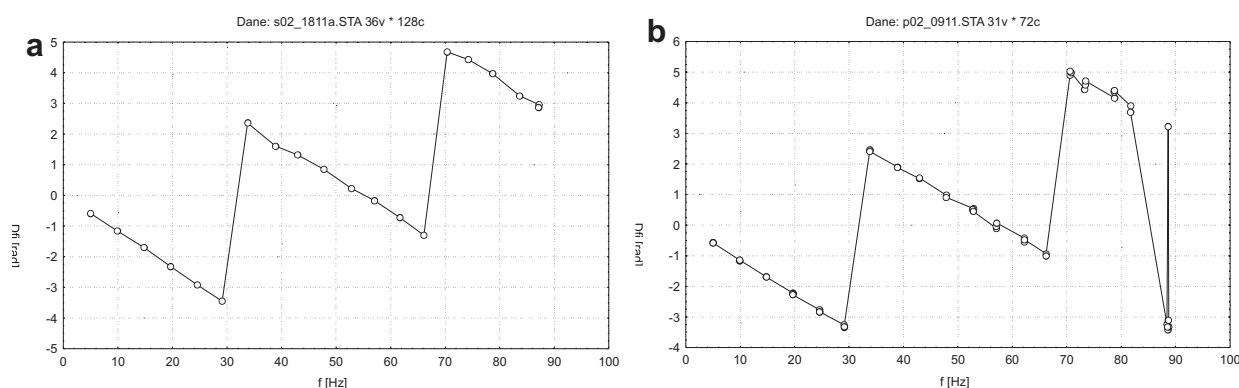
Każde z trzech włókien ma długość ok. 3.5 mm i rezystancję ok. 10 Ω . Odległość nadajnika od pierwszego detektora wynosi 3.0 mm, natomiast odległość między detektorami wynosi ok. 5.5 mm. Dokładny opis technologii wykonania i montażu tego czujnika termooanemometrycznego jest zawarty w pracy [6].

Czujnik trójwłóknowy użyty w eksperymentach ma małe wymiary, w znikomy sposób zaburza pole prędkości oraz ze względu na swoje parametry i właściwości jest uniwersalny w różnych zastosowaniach wraz z czterokanałowym termooanemometrycznym systemem pomiarowym.

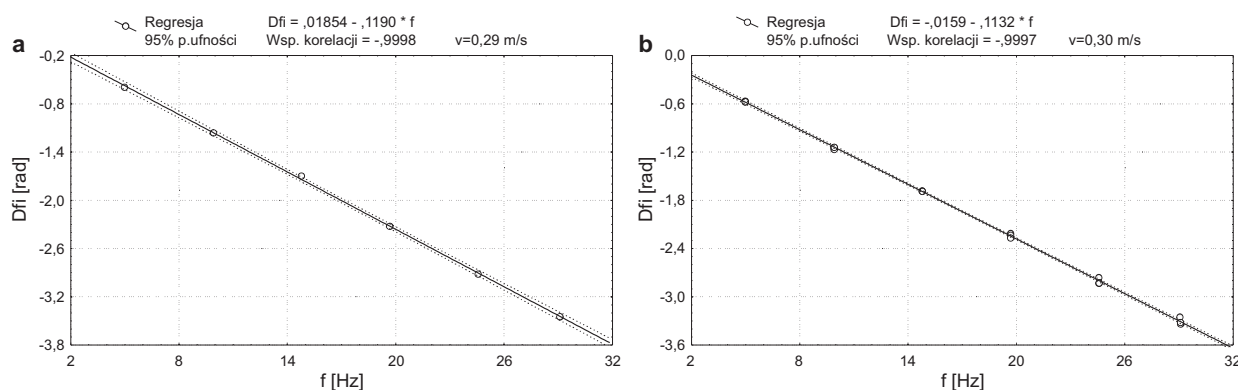
Specjalistyczne oprogramowanie systemu [7] realizuje tak różnorodne funkcje, że pomiar prędkości metodą fal ciepłych stanowi tylko jedną z wielu możliwości aplikacji metrologicznych.

5. Przebieg i wyniki eksperymentów

Badany system pracował w układzie fali ciepłej. Zastosowano fale sinusoidalne oraz prostokątne. Średnia wartość współczynnika nagrzania nadajnika wynosiła 1,5 a amplituda fali 25%. Generowano fale w zakresie częstotliwości od 5 do 90 Hz. Badania przeprowadzono dla prędkości od 0,10 do 4 m/s. Na rys. 4 przedstawiono zależność zmierzonego przesunięcia fazy fali na odbiornikach od częstotliwości dla prędkości przepływu 0,3 m/s. Zależność ta jest liniowa, zgodnie ze wzorem na przyrost fazy fali o częstotliwości f i prędkości V na drodze Δl : $\Delta\varphi = 2\pi f \frac{\Delta l}{V}$. Wzór ten jest podstawą do wyliczenia prędkości przepływu, pod warunkiem, że jest ona równa prędkości fali [8]. Tak więc liniowość zmierzonej zależności jest istotnym kryterium właściwego doboru częstotliwości generowanej fali i odległości pomiędzy detektorami. Na wykresach obserwujemy skok przyrostu fazy o wartość 2π . Niejednoznaczność wyznaczenia różnicy faz ogranicza zakres stosowanych częstotliwości fali przy małych prędkościach. Na rys. 5 przedstawiono fragment zmierzonej zależności w zakresie do 30 Hz, który posłużył do wyliczenia prędkości przepływu. Zarówno dla fali prostokątnej jak i sinusoidalnej widać dobrą jakość dopasowania prostej (współczynnik korelacji lepszy niż 0,999), oraz pomimo małej ilości punktów użytych do dopasowania, małą różnicę współczynnika

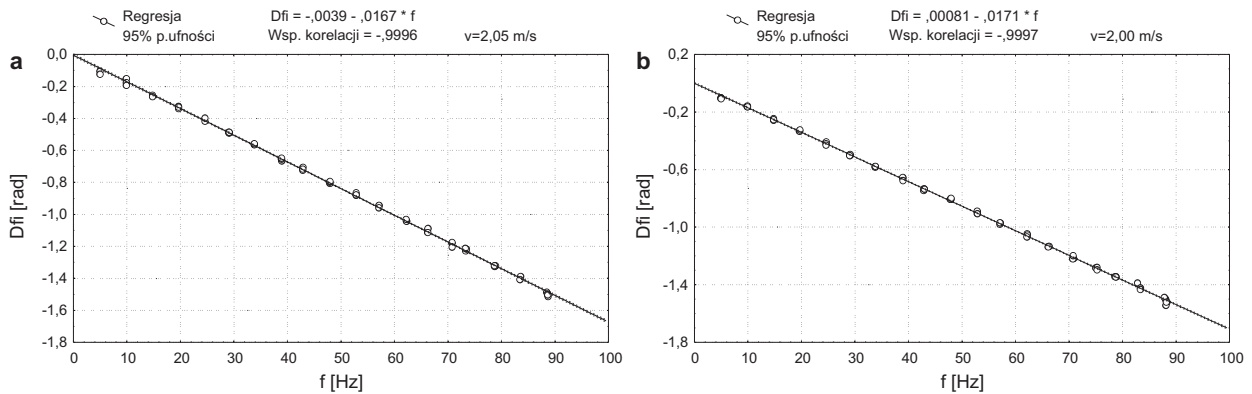


Rys. 4. Przesunięcie fazy fali ciepłej w funkcji częstotliwości dla prędkości przepływu $v = 0,30$ m/s; a – fala sinusoidalna, b – prostokątna

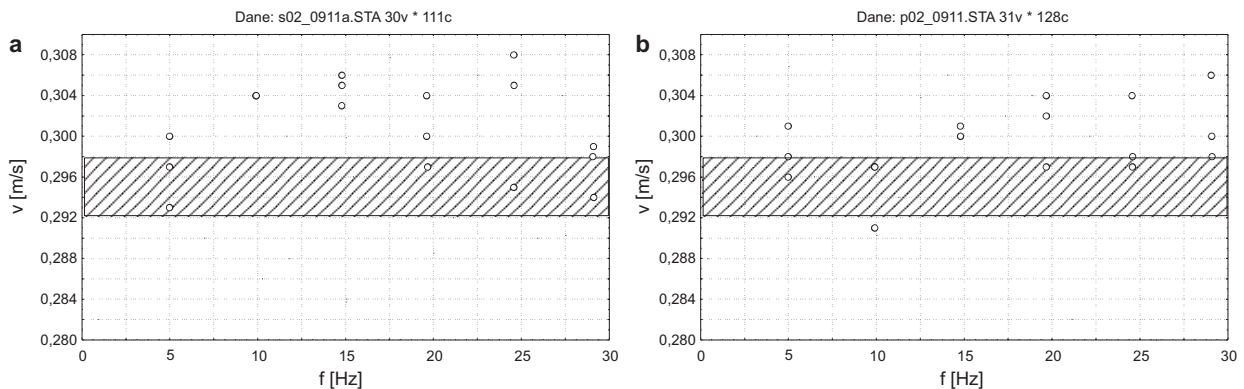


Rys. 5. Przesunięcie fazy fali ciepłej w funkcji częstotliwości fali dla prędkości przepływu $v = 0,30$ m/s i dopasowana prosta; a – fala sinusoidalna, b – prostokątna

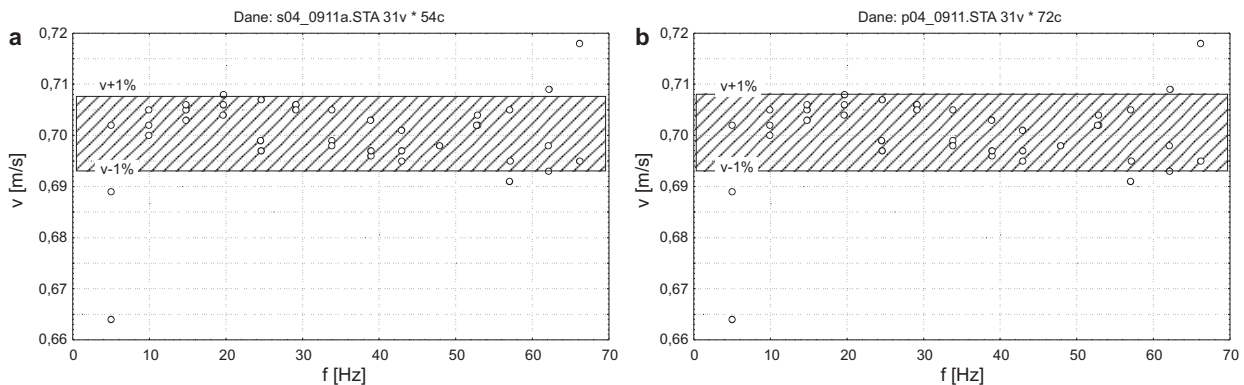
kierunkowego prostych, co wyraża się dobrą zgodnością wyznaczonych prędkości dla fali sinusoidalnej i prostokątnej. Metodę tę, którą można nazwać metodą stałej odległości (bo odległość między odbiornikami jest stała) i zmiennej częstotliwości zastosowano do określenia prędkości wzorcowej, do której odnoszono prędkość wyznaczoną z przesunięcia fazy fali cieplnej o ustalonej częstotliwości. Przykładowy wykres takiego dopasowania dla prędkości przepływu 2m/s przedstawiono na rys. 6. Z uwagi na większą prędkość, dla stosowanych częstotliwości różnica faz jest wyznaczana jednoznacznie. Na rys. 7-12 przedstawiono za-



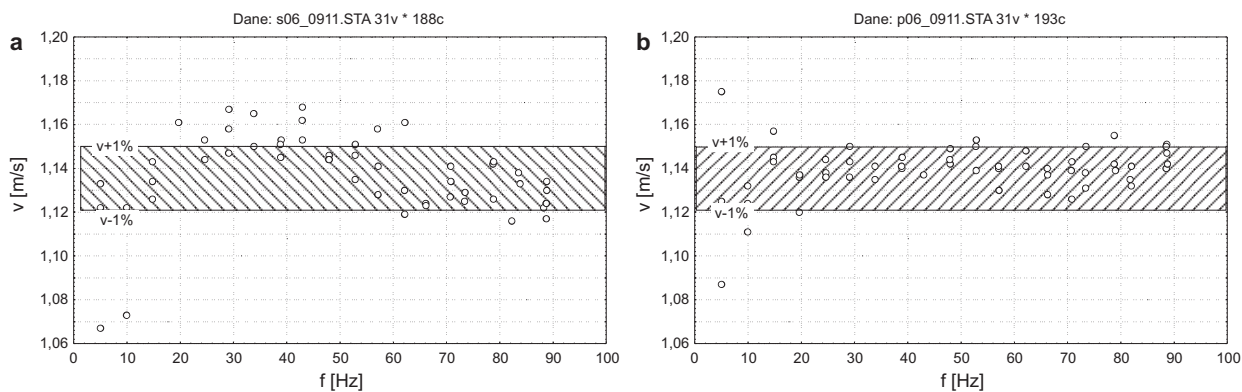
Rys. 6. Przesunięcie fazy fali cieplnej w funkcji częstotliwości fali dla prędkości przepływu $v = 2,03$ m/s i dopasowana prosta



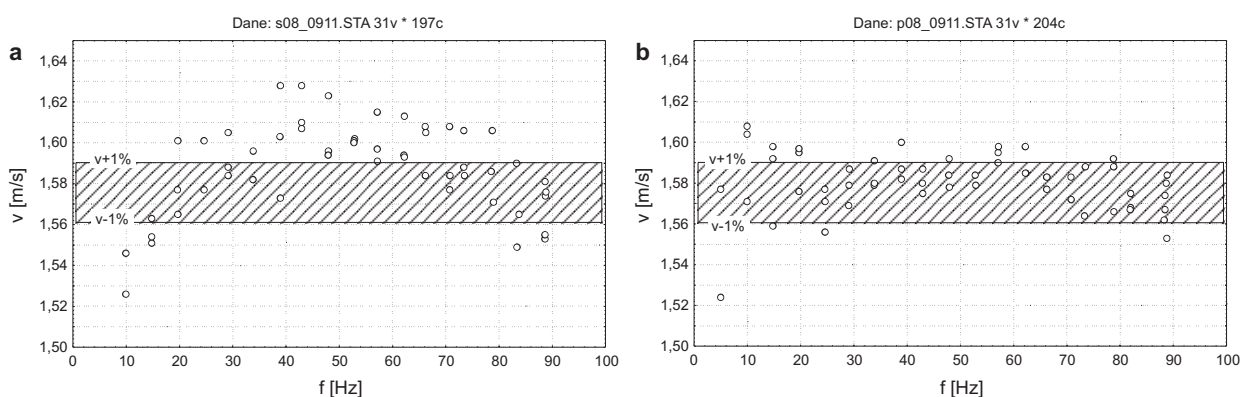
Rys. 7. Porównanie obliczonej prędkości przepływu dla różnych częstotliwości fali cieplnej $v = 0,295$ m/s; a – fala sinusoidalna, b – prostokątna



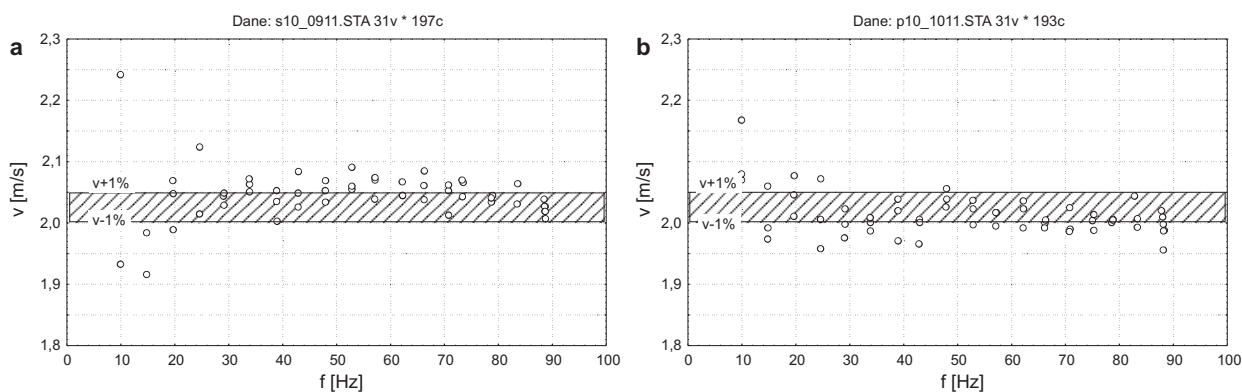
Rys. 8. Porównanie obliczonej prędkości przepływu dla różnych częstotliwości fali cieplnej $v = 0,70$ m/s; a – fala sinusoidalna, b – prostokątna



Rys. 9. Porównanie obliczonej prędkości przepływu dla różnych częstotliwości fali cieplnej $v = 1,135$ m/s;
a – fala sinusoidalna, b – prostokątna

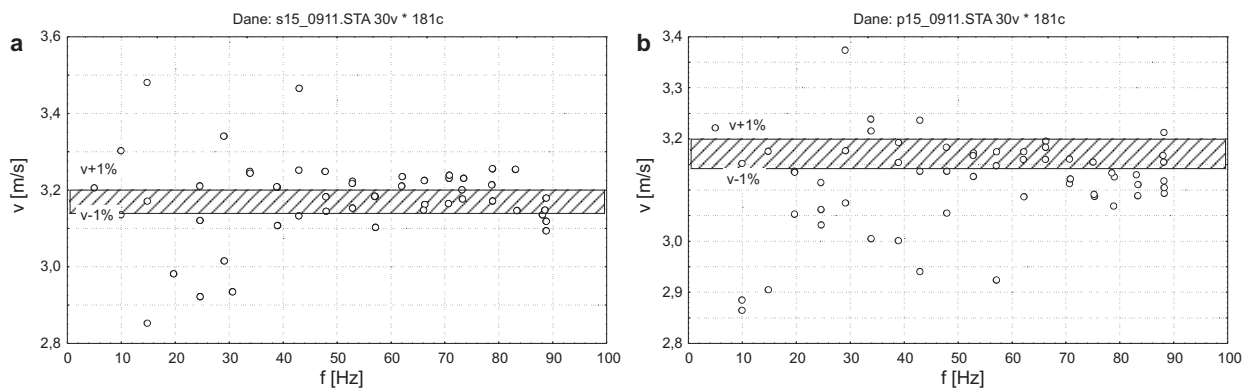


Rys. 10. Porównanie obliczonej prędkości przepływu dla różnych częstotliwości fali cieplnej $v = 1,575$ m/s;
a – fala sinusoidalna, b – prostokątna



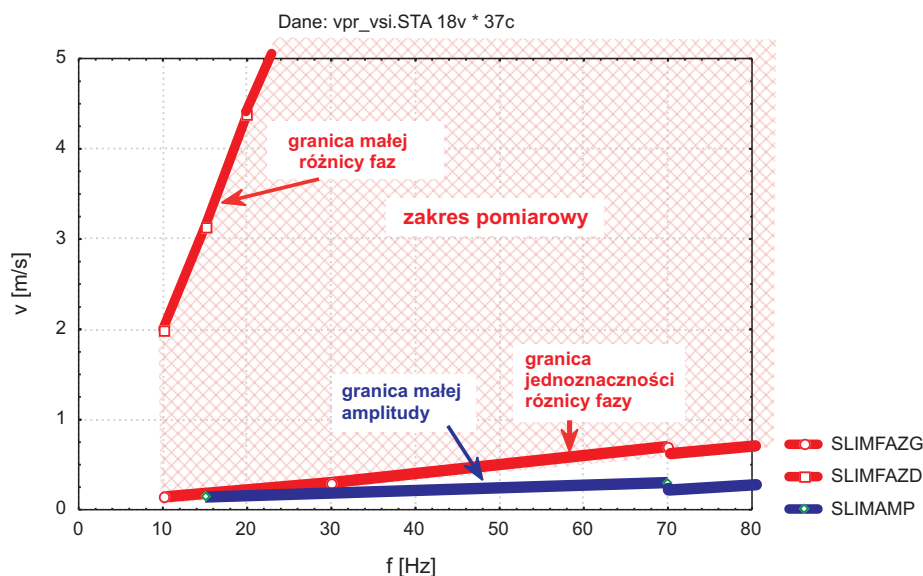
Rys. 11. Porównanie obliczonej prędkości przepływu dla różnych częstotliwości fali cieplnej $v = 2,025$ m/s;
a – fala sinusoidalna, b – prostokątna

leżność wskazań prędkości anemometru z falą cieplną dla różnych częstotliwości fali i prędkości przepływu. Jak widać, układ mierzy prędkość z dobrą dokładnością od 0,7 m/s. Ze wzrostem prędkości przesuną się granice jednoznaczności wyznaczania fazy tak, że dla prędkości powyżej 1 m/s obejmuje już cały zakres częstotliwości. Jednocześnie obserwujemy pogorszenie się dokładności przy małych częstotliwościach, co spowodowane jest małą różnicą faz w tym zakresie, a więc jej pomiar obciążony jest dużą niepewnością. Dla prędkości powyżej 3 m/s niedokładność pomiaru wzrasta. Przyczyną jest wpływ niepewności określenia czasu



Rys. 12. Porównanie obliczonej prędkości przepływu dla różnych częstotliwości fali ciepłej $v = 3,17$ m/s;
a – fala sinusoidalna, b – prostokątna

przez system pomiarowy na różnicę faz fali, który rośnie wraz z prędkością fali. Aby prawidłowo zmierzyć przesunięcie fazowe sygnałów muszą mieć one odpowiednią amplitudę. Ponieważ, jak wiadomo fala ciepła zanika wraz ze wzrostem odległości od nadajnika, decydująca w tym przypadku jest wartość amplitudy na drugim odbiorniku. Na rys. 13 przedstawiono zakres pomiarowy używanego systemu w funkcji częstotliwości fali ciepłej. Oczywiście, zależy on zarówno od parametrów fali (amplituda, moc sygnału) jak i użytego czujnika (wzajemnych odległości między nadajnikiem fali i odbiornikami) oraz rodzaju przepływającego gazu. Jak widać obejmuje on szeroki zakres częstotliwości dla prędkości do ok. 4m/s. Jednak, dla uzyskania lepszej dokładności pomiaru należałoby go zawęzić. Pomiar prędkości przepływu metodą fal ciepłych jest pomiarem złożonym. Mimo iż prędkość wyliczana jest z prostej przedstawionej uprzednio zależności, to analiza niepewności pomiaru jest skomplikowana. Po za jakością czujnika istotna jest jakość generowanej fali oraz dokładność określenia jej częstotliwości i przesunięcia fazowego. Należy też wspomnieć, że na niepewność pomiaru wpływają również zjawiska aerodynamiczne związane z obecnością trójwłóknowego czujnika anemometrycznego w badanym przepływie.



Rys. 13. Zakres pomiarowy badanego anemomtru z falą ciepłą

6. Wnioski

Prezentowany anemometr z falą cieplną, zbudowany na bazie termoanemometrycznego wielokanałowego cyfrowego systemu pomiarowego można zastosować do pomiarów w szerokim zakresie małych prędkości. Jego parametry, a więc zastosowany czujnik, generowana fala są wynikiem kompromisu pomiędzy wymaganiami wynikającymi z istoty fizycznej zjawiska rozchodzenia się fal cieplnych w płynącym medium (tłumienie fali), konstrukcji czujnika oraz układów generowania fali i przetwarzania sygnałów zarówno w aspekcie aparaturowym jak i programowym.

Zaletą takiego anemometru jest nieczułość na zmiany temperatury, składu przepływającego gazu, oraz ewentualne zanieczyszczenia w przepływie pod warunkiem, że prędkość fali równa jest prędkości przepływu. Ograniczeniami metody jest wymóg jednorodności pola prędkości przepływu w obszarze czujnika, który jest tu znacznie większy niż dla czujnika z pojedynczym włóknem. Z uwagi na czas potrzebny na zarejestrowanie określonej ilości okresów fali mierzony przepływ powinien być stacjonarny.

Literatura

- [1] Bruun H.H.: *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*; Oxford, University Press, Oxford 1995
- [2] Ligęza P.: *A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications*; Review of Scientific Instruments, nr 1, 2000
- [3] Ligęza P.: *Układy termoanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*; Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie nr 98, Kraków 2001
- [4] Poleszczyk E.: *Termoanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości przepływu gazu*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, Rozprawy, Monografie, 1, 2002.
- [5] Ligęza P.: *High-precision CTA*, MTS News, 4, 1997.
- [6] Rysz J.: *Konstrukcja specjalizowanych czujników termoanemometrycznych do systemu pomiarowego*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 2004.
- [7] Gawor M., Socha K.: *Struktura oprogramowania i możliwości metrologiczne sterowanego komputerowo wielokanałowego termoanemometrycznego systemu pomiarowego*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 2004.
- [8] Kielbasa J.: *Teoretyczne, aparaturowe i programowe ograniczenia pracy anemometru z falą cieplną*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 2004.

Experimental verification of multi canal hot-wire measurement system working as the thermal wave anemometer

Abstract

This work presents the computer controlled multi canal hot-wire measurement system for applications in the laboratory measurement systems. The structure of this measurement system is discussed in details, and the range of applications is given. This equipment is dedicated to develop complex computer hot-wire anemometric measuring systems. The results of experimental verification of multi canal hot-wire measurement system working as the thermal wave anemometer is discussed in details.

Keywords: metrology, thermoanemometry, measurement system, wave anemometer

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Z. Smolarski, Instytut Mechaniki Górotworu PAN