

Paweł LIĞĘZA

Pracownia Metrologii Przepływów Zakładu Fizyki Przepływów  
Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Kraków

## PARAMETRY DYNAMICZNE BEZMOSTKOWEGO UKŁADU STAŁOTEMPERATUROWEGO

**Streszczenie.** Nowy bezmostkowy układ stałotemperaturowy jest elektronicznym systemem zasilania czujnika anemometrycznego z grzanym drutem za pomocą kabla czteroprzewodowego. Rozdzielenie doprowadzeń prądowych i napięciowych czujnika pozwala na eliminację wpływu kabla na charakterystykę anemometru. W artykule przedstawiono wyniki numerycznych symulacji i pomiarów przeprowadzonych w celu wyznaczenia pasma przenoszenia układu.

## DYNAMIC PARAMETERS OF NON-BRIDGE CONSTANT- TEMPERATURE CIRCUIT

**Summary.** A new non-bridge constant-temperature circuit is an electronic system for supplying an anemometric hot-wire probe using four-point cable. Separation of probe current and voltage leads eliminated the effects of cable resistance on anemometer characteristic. In this paper results of numerical simulations and measurements for determine bandwidth of this circuit were presented.

### 1. Wprowadzenie

Badania pól prędkości i temperatury w przepływach gazu stanowią istotne zagadnienie metrologiczne w inżynierii środowiska. Jedną ze stosowanych tu metod badawczych jest termooanemometria. Jest ona pośrednią metodą pomiaru prędkości poprzez pomiar strat ciepłych grzanego elementu umieszczonego w przepływie.

Typowym układem pracy czujnika anemometrycznego z gorącym drutem jest układ stałotemperaturowy. Ma on bardzo dobre właściwości zarówno statyczne, jak i dynamiczne. Jest to układ regulacji automatycznej, zasilający czujnik takim prądem, aby średnia temperatura włókna utrzymywana była na zadanym poziomie. Temperatura ta jest stała

niezależnie od zewnętrznych warunków wymiany ciepła. W układzie stałotemperaturowym czujnik umieszczony jest w niezrównoważonym mostku rezystancyjnym. Zadana temperatura czujnika jest uzyskiwana po zrównoważeniu mostka przez zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego. Prąd czujnika jest funkcją prędkości przepływu i innych parametrów wymiany ciepła. Utrzymanie zadanego poziomu współczynnika nagrzania czujnika jest istotnym warunkiem dokładności pomiarów.

Mostkowy układ stałotemperaturowy jest podstawowym układem stosowanym obecnie do zasilania czujnika anemometrycznego z gorącym drutem [1,2,3]. W tym klasycznym układzie czujnik pomiarowy zasilany jest kablem dwuprzewodowym. Wartość rezystancji kabla ma wpływ na poziom współczynnika nagrzania czujnika. Precyzyjne pomiary wymagają więc kompensacji rezystancji kabla. Kompensacja realizowana jest poprzez pomiar rezystancji kabla po zwarciu złącza czujnika. Rezystancja kabla uwzględniana jest w mostku przy zadawaniu współczynnika nagrzania czujnika [3]. Kompensacja taka jest jednak niewystarczająca w przypadku zmian rezystancji kabla wywołanych zmianą temperatury otoczenia podczas procesu pomiarowego. Współczesna literatura anemometryczna nie zawiera opisu metody automatycznej kompensacji rezystancji kabla w mostkowym układzie stałotemperaturowym. Szczególnie przy małym stosunku rezystancji czujnika do rezystancji kabla błędy pomiarowe mogą być tu znaczące.

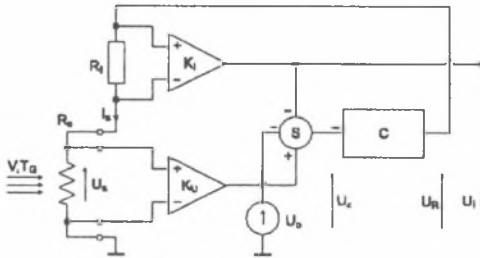
W celu eliminacji tych błędów opracowano stałotemperaturowy układ zasilania czujnika anemometrycznego z czteropunktowym pomiarem jego rezystancji [4]. Jest to oryginalne rozwiązanie układu stałotemperaturowego nie zawierające klasycznego mostka rezystancyjnego. Uzyskano całkowitą eliminację wpływu rezystancji kabla i złącza na współczynnik nagrzania czujnika pomiarowego. Nie jest więc wymagana kompensacja rezystancji kabla. Układ, dzięki swoim zaletom, może znaleźć zastosowanie w precyzyjnych pomiarach anemometrycznych, szczególnie przy małej rezystancji czujnika, małym współczynniku nagrzania i długim kablem zasilającym czujnik w warunkach zmiany temperatury otoczenia kabla.

W opracowanym układzie współczynnik nagrzania czujnika zadawany jest poprzez zmianę wzmocnienia w torze sygnałowym, a nie jak w układzie klasycznym, poprzez zmianę parametrów mostka. Pozwala to na zadawanie współczynnika nagrzania czujnika zewnętrznym sygnałem poprzez wprowadzenie do układu elementu o zmiennym wzmocnieniu, takiego jak mnożący przetwornik cyfrowo-analogowy, mnożarka analogowa czy sterowany wzmacniacz.

W wielu zagadnieniach metrologicznych układ może stanowić alternatywę dla klasycznego układu mostkowego. W referacie omówiono strukturę i podstawy działania układu oraz przedstawiono wyniki badań modelowych i eksperymentalnych.

## 2. Struktura układu pomiarowego

Rozdzielenie doprowadzeń prądowych i napięciowych czujnika pozwala na całkowite wyeliminowanie wpływu rezystancji kabla na charakterystyki statyczne anemometru. Wymaga to zastosowania układu stałotemperaturowego z czteropunktowym pomiarem rezystancji czujnika. Opracowany układ pomiarowy przedstawia rysunek 1. Jest to oryginalne rozwiązanie układu stałotemperaturowego nie zawierające mostka rezystancyjnego.



Rys. 1. Struktura układu pomiarowego  
Fig. 1. Structure of measuring circuit

Elementem pomiarowym jest czujnik  $R_S$  o rozdzielonych doprowadzeniach prądowych i napięciowych. Czujnik umieszczony jest w przepływie medium o prędkości  $V$  i temperaturze  $T_G$ . Napięcie na czujniku  $R_S$  jest wzmacniane we wzmacniaczu różnicowym o wzmocnieniu  $K_U$ , a napięcie proporcjonalne do prądu czujnika na rezystorze  $R_I$  jest wzmacniane we wzmacniaczu różnicowym o wzmocnieniu  $K_I$ . Sygnały wyjściowe ze wzmacniaczy są porównywane w węzle sumacyjnym  $S$ , a sygnał błędny z tego węzła podawany jest do regulatora  $C$ . Zadaniem regulatora jest wytworzenie takiego napięcia  $U_R$  zasilającego czujnik  $R_S$ , aby napięcie błędne  $U_e$  sprowadzać do zera. Przyjmując, że napięcie niezrównoważenia  $U_0$  jest bliskie zera, rezystancja czujnika w stanie ustalonym utrzymywana jest na stałym, zadanym poziomie, zgodnie z zależnością:

$$R_S = R_I \frac{K_I}{K_U}. \quad (1)$$

Poziom nagrzania czujnika zależy więc od wzmocnień  $K_U$ ,  $K_I$  oraz rezystancji  $R_I$ , jest natomiast niezależny od rezystancji kabla i złącz czujnika. Stanowi to podstawową zaletę w stosunku do rozwiązania klasycznego.

Sygnałem wyjściowym z układu jest napięcie  $U_R$  z regulatora  $C$  lub napięcie proporcjonalne do prądu czujnika ze wzmacniacza  $K_I$ :

$$U_I = K_I R_I I_S. \quad (2)$$

Po zwarceniu zacisków prądowych z napięciowymi układ przechodzi w dwupunktowy, przy czym wpływ rezystancji kabla na charakterystyki statyczne anemometru jest tu analogiczny do występującego w przypadku klasycznego układu mostkowego.

Opracowany układ w porównaniu z mostkowym nie zawiera dzielnika rezystancyjnego stanowiącego gałąź mostka, zawiera natomiast dwa dodatkowe wzmacniacze różnicowe, stanowiące źródło szumów. Wzmacniacze te są jednak czynnikiem całkowitego wzmocnienia w pętli sprzężenia zwrotnego. Wzmocnienie regulatora jest tu więc odpowiednio mniejsze niż w układzie mostkowym. Ponadto w węźle sumacyjnym  $S$  następuje częściowa kompensacja szumów z obu wzmacniaczy. Układ nie zawiera również źródła szumów w postaci dzielnika rezystancyjnego stanowiącego gałąź mostka. W układzie mostkowym w zależności od wartości tych rezystancji gałąź ta może stanowić istotne źródło szumów. Dokładne porównanie właściwości szumowych obu układów możliwe jest dla konkretnych rozwiązań rzeczywistych układów pomiarowych.

Ponieważ głównym obszarem zastosowań anemometru stałotemperaturowego są pomiary dynamiczne, istotne zagadnienie stanowi określenie parametrów dynamicznych układu pomiarowego. W tym celu przeprowadzono badania modelowe i eksperymentalne układu.

### 3. Wyniki badań modelowych

Opracowanie modelu matematycznego układu pomiarowego pozwala na przeprowadzenie analizy pracy układu, przeprowadzenie badań symulacyjnych i optymalizacyjnych oraz wyznaczenie parametrów statycznych i dynamicznych. Przy konstrukcji modelu przyjęto strukturę układu pomiarowego przedstawioną na rysunku 1.

Wyróżniono trzy podstawowe elementy układu: czujnik anemometryczny, układ komparacji rezystancji oraz regulator. Model matematyczny układu pomiarowego opracowano opierając się na równaniu opisującym poszczególne jego elementy.

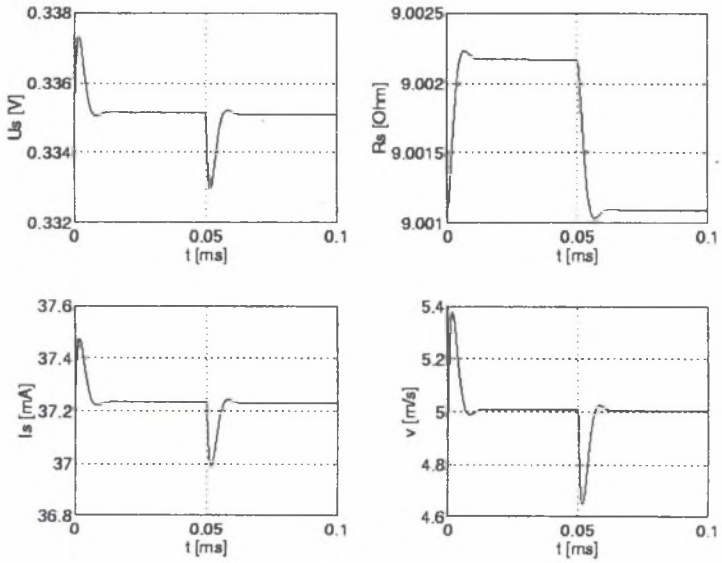
Celem badań modelowych jest poznanie właściwości oraz wyznaczenie i optymalizacja parametrów układu pomiarowego, ze szczególnym uwzględnieniem parametrów dynamicznych. Badania przeprowadzono metodą wielokrotnego numerycznego rozwiązywania układu równań przyjętych jako model matematyczny, przy różnych parametrach modelu. Rozwiązanie takie ma charakter komputerowej symulacji pracy układu pomiarowego. W badaniach modelowych zastosowano program MATLAB. Do rozwiązywania układu równań różniczkowych zastosowano numeryczną metodę Rungego-Kutty piątego rzędu.

Do badań modelowych przyjęto parametry zbliżone do stosowanych w rzeczywistym systemie pomiarowym. Przyjęto typowe parametry czujnika z włóknem wolframowym o średnicy trzech mikrometrów uzyskane z badań eksperymentalnych.

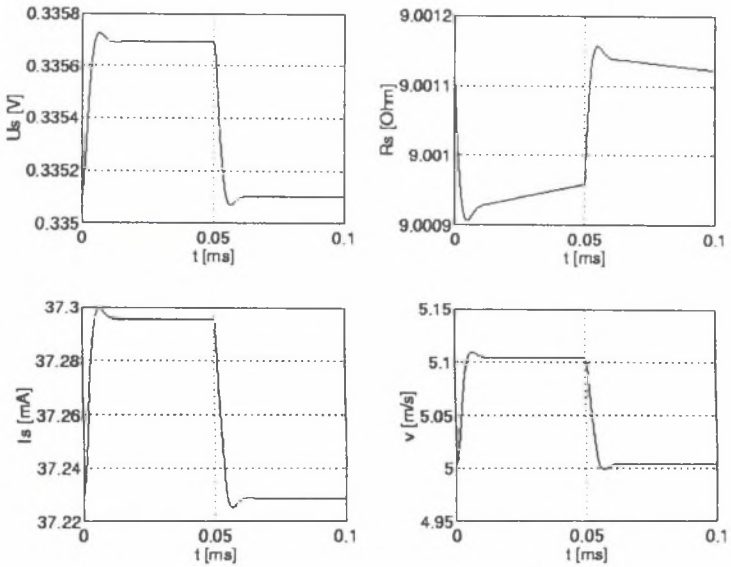
Przebieg pojedynczej symulacji polegał na wyznaczeniu stanu ustalonego dla przyjętego zbioru parametrów, a następnie wyznaczeniu odpowiedzi układu dla zadanego wymuszenia. Stosowano wymuszenia skokowe w postaci zmiany wybranego parametru o zadaną wartość, a następnie przywrócenie pierwotnej wartości. Badano zachowanie układu dla wymuszenia skokowej zmiany napięcia niezrównoważenia  $\Delta U_0$  oraz prędkości przepływu  $\Delta V$ . Skok  $\Delta U_0$  jest stosowany w rzeczywistych układach pomiarowych do regulacji i oceny parametrów dynamicznych układu. Przyjęto wartości  $\Delta U_0 = 0.1$  mV oraz  $\Delta V = 0.1$  m/s.

Rezultaty badań modelowych zaprezentowano na rysunkach przedstawiających przebiegi napięcia  $U_S$ , rezystancji  $R_S$  i prądu  $I_S$  czujnika anemometrycznego oraz prędkości przepływu medium  $v$  dla wybranych parametrów i wymuszeń. Przykładowo przedstawiono wyniki symulacji dla współczynnika nagrzania  $\eta = 1.8$ , temperatury medium  $T_G = 293$  K i prędkości przepływu  $V = 5$  m/s. Rysunek 2 przedstawia przebieg symulacji dla zadanego skoku napięcia niezrównoważenia  $\Delta U_0$ , a rysunek 3 dla zadanego skoku prędkości  $\Delta V$ .

W wyniku badań modelowych wyznaczono pasmo przenoszenia układu dla przyjętych parametrów. Dla współczynnika nagrzania  $\eta = 1.8$  w zakresie prędkości od 0 do 20 m/s uzyskano pasmo przenoszenia od 70 do 104 kHz. Dla współczynnika nagrzania  $\eta = 1.4$  uzyskano pasmo przenoszenia od 55 do 76 kHz. Dla skoku napięcia niezrównoważenia i dla skoku prędkości uzyskano zbliżone wyniki.



Rys. 2. Przebieg symulacji dla skoku napięcia niezrównoważenia  
Fig. 2. The result of the simulation for offset voltage step change



Rys. 3. Przebieg symulacji dla skoku prędkości  
Rys. 3. The result of the simulation for velocity step change

#### 4. Badania eksperymentalne

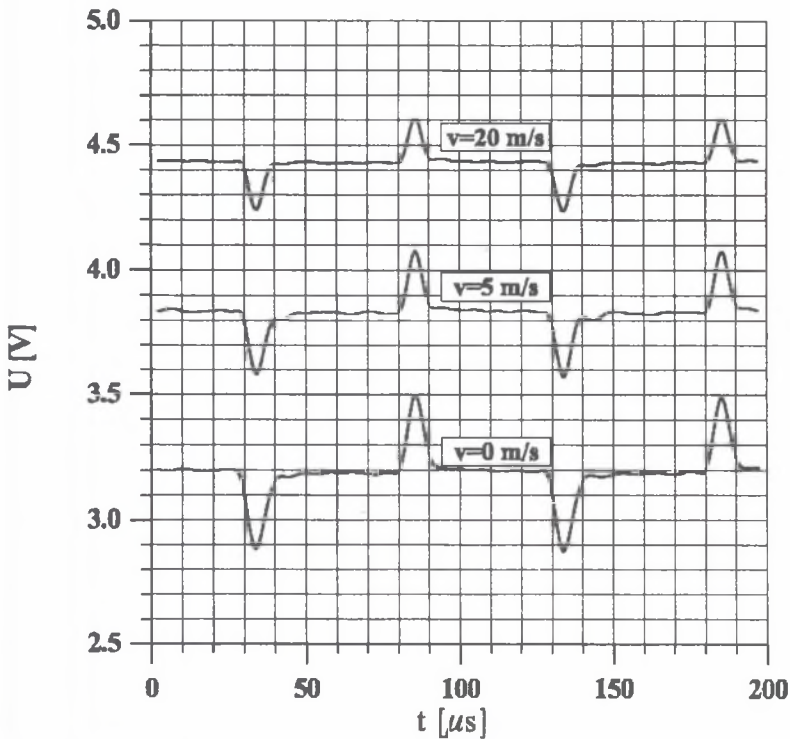
Celem badań układu stałotemperaturowego z czteropunktowym pomiarem rezystancji czujnika jest pomiar i optymalizacja parametrów metrologicznych układu oraz dokonanie oceny możliwości aplikacyjnych. Opierając się na przeprowadzonych analizach i badaniach symulacyjnych wykonano laboratoryjny układ pomiarowy wraz z czujnikami anemometrycznymi [5]. Badania prowadzono na stanowisku pomiarowym składającym się z tunelu aerodynamicznego z komputerowym układem sterowania, oraz systemu przetwarzania i rejestracji danych pomiarowych. System ten pozwala na rejestrację przebiegów z rozdzielczością 12 bitów i maksymalną częstotliwością próbkowania 10 MHz. Przeprowadzono badania charakterystyk statycznych oraz parametrów dynamicznych układu.

Badania parametrów dynamicznych polegały na rejestracji odpowiedzi układu pomiarowego na wymuszenie prostokątne napięcia niezrównoważenia układu stałotemperaturowego. Badania takie mają na celu wyznaczenie pasma przenoszenia układu dla pomiaru prędkości przepływu. Rejestrowano przebiegi napięcia wyjściowego z układu przy załączonym generatorze sygnału prostokątnego. Napięcie wyjściowe jest liniową funkcją prądu czujnika ze współczynnikiem proporcjonalności 0.1 V/mA. Częstotliwość wymuszenia prostokątnego wynosiła 10 kHz, a amplituda miała stałą wartość we wszystkich pomiarach.

Badania przeprowadzono w układzie czteropunktowym dla czujnika i kabli zasilających, takich jak w badaniach charakterystyk statycznych. W układzie pomiarowym nastawiano zadany współczynnik nagrzania czujnika względem jego rezystancji w temperaturze otoczenia zmierzonej w układzie czteropunktowym. Przyjęto dwa współczynniki nagrzania  $\eta = 1.4$  i  $1.8$  i trzy prędkości przepływu  $V = 0, 5, 20$  m/s.

W celu uzyskania przebiegów optymalnych ze względu na pasmo przenoszenia każdorazowo dokonywano regulacji układu. Przebiegi dla kabla o długości  $l = 10$  m, współczynnika nagrzania  $\eta = 1.8$  i trzech prędkości przepływu przedstawiono na rysunku 4, a dla współczynnika nagrzania  $\eta = 1.4$  na rysunku 5.

Dla kabla o długości  $l = 2$  m uzyskano podobne wyniki. Na podstawie pomiarów wyznaczono pasmo przenoszenia układu dla przyjętych parametrów. Dla współczynnika nagrzania  $\eta = 1.8$  w zakresie prędkości od 0 do 20 m/s uzyskano pasmo przenoszenia od 70 do 100 kHz. Dla współczynnika nagrzania  $\eta = 1.4$  uzyskano pasmo przenoszenia od 50 do 70 kHz. Wyniki te są zbliżone do wartości uzyskanych w badaniach modelowych.



Rys. 4. Odpowiedź układu na wymuszenie prostokątne,  $\eta = 1.8$   
 Fig. 4. The response of the circuit for square wave test,  $\eta = 1.8$

Wykonano również pomiar parametrów szumowych układu. Stosunek sygnału do szumu w paśmie pomiarowym do 100 kHz wynosi około 60 dB. Zwiększenie tego współczynnika wymaga przeprowadzenia optymalizacji szumowej układu.

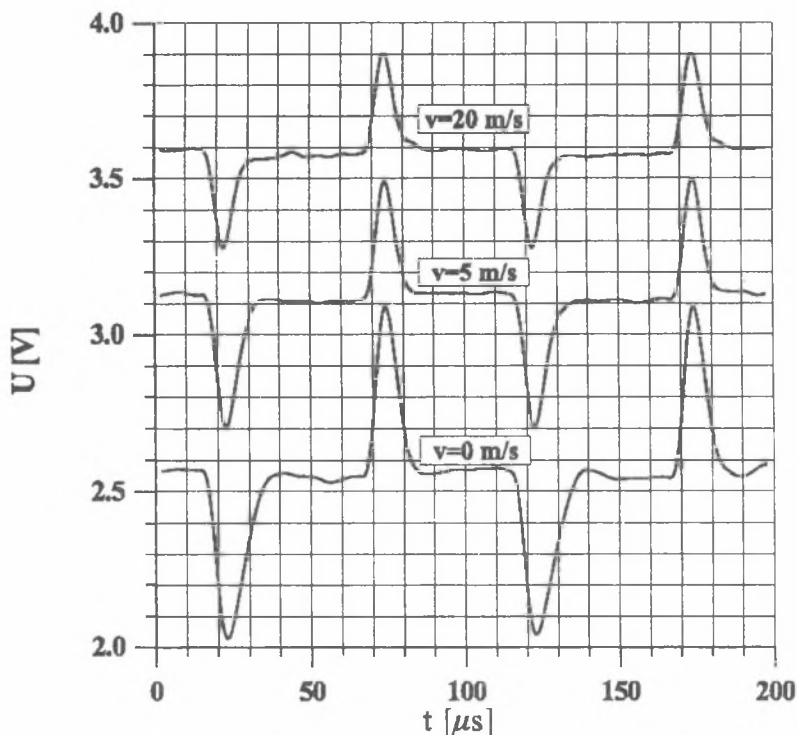
Uzyskane parametry dynamiczne badanego układu pomiarowego są więc zbliżone do parametrów typowego układu mostkowego.

## 5. Wnioski

Opisany układ stałotemperaturowy stanowi nowe rozwiązanie systemu zasilanie czujnika anemometrycznego. Najważniejsze cechy układu to:

- eliminacja wpływu rezystancji kabla na współczynnik nagrzania czujnika,
- stabilność charakterystyk statycznych i dobre parametry dynamiczne,
- możliwość pracy czujnika w układzie dwu- i czteropunktowym,
- sterowalność, otwarta struktura i możliwości modyfikacji układu.



Rys. 5. Odpowiedź układu na wymuszenie prostokątne,  $\eta = 1.4$ Fig. 5. The response of the circuit for square wave test,  $\eta = 1.4$ 

W porównaniu do tradycyjnego układu mostkowego układ ma lepsze parametry charakterystyk statycznych przy zbliżonych parametrach dynamicznych. Uzyskano to za cenę rozbudowy układu pomiarowego. W wielu zagadnieniach metrologicznych zastosowanie nowego układu z czteroprzewodowym kablem zasilania czujnika w miejsce dotychczas stosowanego układu mostkowego może być celowe. Pozwoli to na minimalizację błędów pomiarowych i uproszczenie obsługi systemu pomiarowego. Istnieją również obszary zastosowań, w których oba układy mogą być stosowane zamiennie. Natomiast w pomiarach przepływów szybkozmiennych w zakresie bardzo wysokich częstotliwości korzystne jest stosowanie układu mostkowego, który ze względu na niewielką ilość elementów może być łatwiej optymalizowany ze względu na parametry dynamiczne i szumowe. Nowy układ stanowi więc jedynie alternatywę dla układu mostkowego. O wyborze układu powinna decydować analiza problemu metrologicznego.

Właściwości nowego układu mogą pozwolić na minimalizację błędów i optymalizację procesu pomiarowego w następujących obszarach badań anemometrycznych:

- pomiary przy długich kablach zasilających czujnik, w szczególności przy dużych zmianach temperatury otoczenia kabla,
- pomiary z zastosowaniem różnych kabli zasilających czujnik,
- pomiary przy zastosowaniu czujników o małej rezystancji,
- pomiary przy małej wartości współczynnika nagrzania czujnika,
- pomiary w zakresie niewielkich prędkości przepływu,
- specjalizowane układy pomiarowe wymagające precyzyjnego zadawania i utrzymania współczynnika nagrzania czujnika.

Prezentowany układ pomiarowy został praktycznie zastosowany w anemometrycznych systemach pomiarowych opracowanych i wykonanych przez autora na potrzeby badań laboratoryjnych.

## LITERATURA

1. Sandborn V. A.: Resistance temperature transducers Metrology Press; Fort Collins Colorado 1972.
2. Lomas C. G.: Fundamentals of hot wire anemometry; Cambridge University Press, Cambridge 1986.
3. Bruun H. H.: Hot-wire Anemometry: Principles and Signal Analysis; University Press, Oxford 1995.
4. Cierniak W., Kielbasa J., Krach A., Ligęza P.: Sposób pomiaru prędkości przepływu płynu oraz termoanemometr stałorezystancyjny do pomiaru prędkości przepływu płynu; Patent PL 169305 B1, Warszawa 1992.
5. Ligęza P.: High-Precision CTA; MST News Poland nr 4, 1997.

Recenzent: Dr hab.inż. Zbigniew Popiołek  
Prof. Politechniki Śląskiej

**Abstract**

A new non-bridge constant-temperature circuit is an electronic system for supplying an anemometric hot-wire probe using four-point cable. Separation of probe current and voltage leads eliminated the effects of cable resistance on anemometer characteristic. In this paper results of numerical simulations and measurements for determine bandwidth of this circuit were presented. The presented circuit enables high-precision laboratory hot-wire anemometric measurements especially in the conditions of low sensor resistance, low overheat ratio range and long probe supply cable with bandwidth about 100 kHz.