

# Modyfikacja mostkowego układu anemometru stałotemperaturowego do badań w szerokim zakresie fluktuacji prędkości przepływu

PAWEŁ LIGĘZA , PAWEŁ JAMRÓZ , PIOTR OSTROGÓRSKI 

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

## Streszczenie

Stosowana w badaniu przepływów turbulentnych metoda termooanemometryczna polega na pomiarze wielkości fizycznych opisujących przepływ poprzez pomiar strat cieplnych miniaturowego nagrzanego elementu. Termooanemometr umożliwia pomiary przepływów szybkozmiennych w szerokim zakresie prędkości, przy dobrym stosunku sygnału do szumu. Pasma przenoszenia sięga setek kiloherców, a zakres mierzonych prędkości od ułamków metra na sekundę do prędkości ponaddzwiękowych. W artykule przedstawiono koncepcję modyfikacji klasycznego mostkowego układu anemometru stałotemperaturowego z przeznaczeniem do badań w szerokim zakresie fluktuacji prędkości przepływu. Istotą zaproponowanej modyfikacji jest przede wszystkim ograniczenie szumów własnych układu przy zachowaniu bardzo dobrych parametrów dynamicznych. Układ przeznaczony jest do badań przepływów turbulentnych o szerokim spektrum częstotliwościowym fluktuacji prędkości.

**Słowa kluczowe:** przepływy turbulentne, anemometr stałotemperaturowy, pasmo przenoszenia, dynamika układu, szумы własne

## 1. Wprowadzenie

Pomimo ciągłego rozwoju nowych technik pomiaru przepływów metoda termooanemometryczna w dalszym ciągu pozostaje doskonałym narzędziem badawczym w metrologii przepływów turbulentnych. Przepływ taki stanowi ruch płynu o charakterze nieuporządkowanym, przy czym opisujące go zmienne są losowe zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. W przepływach turbulentnych występują wiry o szerokim zakresie skali czasowej i przestrzennej. Zjawisko występowania wirów powoduje intensyfikację przenoszenia ciepła, masy i pędu w przepływie [1].

Stosowana w badaniu przepływów turbulentnych metoda termooanemometryczna polega na pomiarze wielkości fizycznych opisujących przepływ poprzez pomiar strat cieplnych miniaturowego nagrzanego elementu. Termooanemometr umożliwia pomiary przepływów szybkozmiennych w szerokim zakresie prędkości, przy dobrym stosunku sygnału do szumu. Pasma przenoszenia sięga setek kiloherców, a zakres mierzonych prędkości od ułamków metra na sekundę do prędkości ponaddzwiękowych. Metoda umożliwia pomiar składowych przestrzennych oraz prowadzenie pomiarów wielopunktowych, natomiast inwazyjność metody jest znikoma [2].

Anemometr stałotemperaturowy jako układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym pod względem teoretycznym badań Freymuth [3]. Teoria ta ogranicza się do analizy anemometru dla małych sygnałów. Davis w pracy [4] badał pasmo przenoszenia anemometru stałotemperaturowego. Zastosował on prosty model dynamiczny drugiego rzędu. Metodę testowania pasma przenoszenia termooanemometru za pomocą elektrycznego sygnału prostokątnego wprowadził Freymuth w pracy [5]. Praca ta zawiera zależność pozwalającą na oszacowanie częstotliwości granicznej układu poprzez pomiar czasu odpowiedzi na wymuszenie testowe. Czynniki decydujące o paśmie przenoszenia anemometru przedstawił w swojej pracy Watmuff [6]. Dalsze prace Saddoughi i Veeravalli [7] dotyczyły badania anemometru w zakresie bardzo wysokich częstotliwości. Wykazali oni, że pasmo przenoszenia anemometru stałotemperaturowego jest limitowane przez szумы własne

układu. Efekty dynamiczne rzędu wyższego niż trzeci analizował Freymuth [8]. Payne [9] i Li [10] wykazali, że ze względu na istnienie przewodzenia ciepła z włókna do wsporników istnieje konieczność korekcji charakterystyki częstotliwościowej anemometru już dla częstotliwości rzędu pojedynczych herców. Wpływ elementów elektronicznych na częstotliwość graniczną układu analizował Li [11,12]. W ramach dalszych badań dynamiki anemometru stałotemperaturowego Ligęza [13-15] zaproponował koncepcję wprowadzenia do układu stałotemperaturowego regulatora adaptacyjnego działającego tak, aby uzyskać stałe pasmo przenoszenia anemometru w funkcji prędkości przepływu. Poprzez wprowadzenie drugiej pętli sprzężenia zwrotnego sygnał wyjściowy z anemometru steruje parametrami regulatora w taki sposób, aby w szerokim zakresie prędkości przepływu pasmo przenoszenia przyrządu było możliwie stałe. Zastosowanie tej metody w pomiarach przepływów turbulentnych pozwala na minimalizację dynamicznych błędów pomiarowych. W pracach [16,17] Ligęza przedstawił analizę możliwości zastosowania metody termooanemometrycznej w szerokim spektrum parametrów przepływu.

W tej pracy przedstawiono koncepcję modyfikacji klasycznego mostkowego układu anemometru stałotemperaturowego z przeznaczeniem do badań w szerokim zakresie fluktuacji prędkości przepływu. Istotą zaproponowanej modyfikacji jest przede wszystkim ograniczenie szumów własnych układu przy zachowaniu bardzo dobrych parametrów dynamicznych. Układ przeznaczony jest do badań przepływów turbulentnych o szerokim spektrum częstotliwościowym fluktuacji prędkości.

## 2. Analiza właściwości mostkowego układu stałotemperaturowego

Fizyczna realizacja anemometru stałotemperaturowego realizowana jest klasycznie w postaci mostkowego układu elektronicznego ze sprzężeniem zwrotnym. Elektroniczny układ stałotemperaturowy jest układem zasilania termooanemometrycznego rezystancyjnego przetwornika temperatury w taki sposób, aby poprzez ogrzewanie ciepłem Joule'a-Lenza utrzymywać temperaturę przetwornika na zadanym poziomie, niezależnie od zewnętrznych warunków odbierania ciepła z przetwornika. Rezystancyjny przetwornik temperatury to element wykonany z przewodnika lub półprzewodnika, którego rezystancja zmienia się w sposób istotny wraz ze zmianą jego temperatury. W układzie termooanemometru rezystancyjny przetwornik temperatury stanowi czujnik termooanemometryczny z grzanym elementem pomiarowym umieszczony w przepływie płynu. Prędkość przepływu wyznaczana jest jako funkcja zasilającego czujnik prądu elektrycznego, który przy stałej temperaturze czujnika jest zależny od prędkości przepływu. Termooanemometr stałotemperaturowy stosowany jest przede wszystkim do badania prędkości przepływów szybkozmiennych w szerokim zakresie częstotliwości fluktuacji prędkości. Inne zastosowania elektronicznego układu stałotemperaturowego to układy pomiaru składu chemicznego i stężenia gazów, ciśnienia w rozrzedzonych gazach, pomiary kalorymetryczne, bolometry oraz układy stabilizacji temperatury.

Typowy, klasyczny elektroniczny układ stałotemperaturowy, stanowiący układ ze sprzężeniem zwrotnym, składa się z rezystancyjnego mostka Wheatstone'a, układu różnicowego oraz regulatora elektronicznego. Mostek Wheatstone'a posiada dwie gałęzie: czynną złożoną rezystancyjnego przetwornika temperatury i połączonego z nim szeregowo rezystora, oraz bierną złożoną z dwóch rezystorów połączonych szeregowo. Mostek bez zasilania jest niezrównoważony, natomiast poprzez zasilanie mostka uzyskuje się ogrzewanie i wzrost rezystancji przetwornika temperatury, co umożliwia zrównoważenie mostka. Jest to realizowane w procesie regulacji automatycznej. Sygnał z przekątnej mostka podawany jest do układu różnicowego wytwarzającego sygnał błędu. Sygnał błędu doprowadzany jest do elektronicznego regulatora, którego zadaniem jest zasilanie mostka takim napięciem, aby minimalizować sygnał błędu, a więc zrównoważyć mostek. W stanie ustalonym temperatura rezystancyjnego przetwornika temperatury utrzymywana jest na stałym poziomie, wyznaczonym za pomocą wartości rezystorów w mostku.

W wielu zastosowaniach ważne jest, aby elektroniczny układ stałotemperaturowy posiadał dobre właściwości dynamiczne, to znaczy reagował możliwie szybko na zmiany ciepła odbieranego od rezystancyjnego przetwornika temperatury, a przy tym pracował stabilnie bez oscylacji własnych. Istotnym parametrem jest też możliwie niski poziom szumów własnych układu. W tym celu do mostka rezystancyjnego wprowadzane są dodatkowe elementy elektroniczne. Znane jest rozwiązanie [18], w którym w gałęzi czynnej mostka do rezystora dołączony jest równolegle dwójnik szeregowy RC, a w gałęzi biernej włączona jest szeregowo indukcyjność. Te dodatkowe elementy umożliwiają optymalizację właściwości dynamicznych układu. W innej koncepcji [19] właściwości dynamiczne układu optymalizowane są poprzez automatyczną regulację napięcia niezrównoważenia regulatora. W tym rozwiązaniu w mostku zastosowano również dodatkowe

elementy indukcyjne. Mostkowy układ stałotemperaturowy z regulacją właściwości dynamicznych poprzez zmiennoprądowe dodatnie i ujemne sprzężenie zwrotne o charakterystyce regulowanej przez potencjometry przedstawiono w pracy [20].

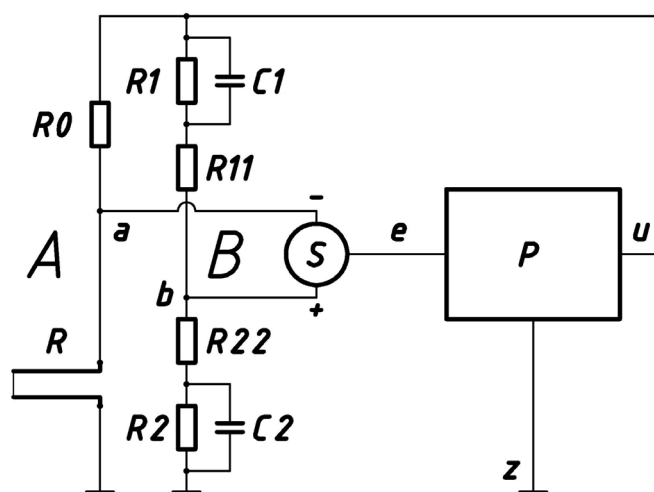
W elektronicznym układzie stałotemperaturowym prąd płynący w gałęzi czynnej ogrzewa rezystancyjny przetwornik temperatury, a więc wartość prądu musi być odpowiednio duża. Implikuje to odpowiednio niską rezystancję gałęzi czynnej mostka. Natomiast prąd płynący w gałęzi biernej zależy jest od stosunku rezystancji gałęzi biernej do rezystancji gałęzi czynnej. Aby niepotrzebnie nie rozgrzewać gałęzi biernej oraz oszczędzać prąd pobierany ze źródła zasilania, w typowych rozwiązaniach rezystancja gałęzi biernej jest kilka do kilkudziesięciu razy większa od rezystancji gałęzi czynnej. Jednak wysoka wartość rezystancji zastosowanych w gałęzi biernej powoduje zwiększenie szumów własnych układu oraz zwiększenie wpływu pojemności pasożytniczych na właściwości dynamiczne układu. Nawet niewielkie pojemności pasożytnicze układu o wielkościach losowych w połączeniu z rezystancjami gałęzi biernej o dużych wartościach wpływają na właściwości dynamiczne układu stałotemperaturowego. Utrudnia to uzyskanie optymalnego pasma przenoszenia, a nawet może stanowić przyczynę niestabilnej pracy układu.

Tak więc stosowana w znanych rozwiązaniach układu stałotemperaturowego gałąź bierna mostka złożona wyłącznie z dwóch połączonych szeregowo rezystorów o wartościach znacznie większych niż w gałęzi czynnej, chociaż jest korzystna ze względów energetycznych, w wielu zastosowaniach stanowi istotną wadę układu. Wada ta powoduje duże szumy własne oraz nieoptymalne właściwości dynamiczne układu. Jest to problem szczególnie istotny w układach przeznaczonych do pomiaru szybkozmiennych wielkości fizycznych, takich jak prędkość przepływu, w szerokim zakresie częstotliwości fluktuacji prędkości.

### 3. Koncepcja modyfikacji układu mostkowego termooanemometru

W proponowanym rozwiązaniu elektroniczny układ stałotemperaturowy, stanowiący układ ze sprzężeniem zwrotnym, składający się z mostka pomiarowego posiadającego dwie gałęzie: czynną złożoną rezystancyjnego przetwornika temperatury i połączonego z nim szeregowo rezystora, oraz biernej, a także układu różnicowego oraz regulatora elektronicznego, charakteryzuje się tym, że gałąź bierna mostka złożona jest z dwóch połączonych szeregowo dwójników  $RC$  zawierających połączone równolegle elementy rezystancyjne i pojemnościowe.

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie proponowany, zmodyfikowany elektroniczny układ stałotemperaturowy z optymalizacją właściwości dynamicznych i redukcją szumów własnych.



Rys. 1. Schemat zmodyfikowanego układu stałotemperaturowego z optymalizacją właściwości dynamicznych

Elektroniczny układ stałotemperaturowy składa się z mostka posiadającego gałąź czynną  $A$  i gałąź bierną  $B$ , układu różnicowego  $S$  oraz regulatora elektronicznego  $P$ . Gałąź czynna mostka złożona jest z rezystancyjnego przetwornika temperatury  $R$  i połączonego z nim szeregowo rezystora  $R0$ , natomiast gałąź bierna mostka złożona jest z połączonych szeregowo dwóch dwójników rezystancyjno – pojemnościowych, z których pierwszy składa się z rezystora  $R11$  o mniejszej wartości połączonego szeregowo z układem rów-

noległym rezystora  $R1$  o większej wartości i pojemności  $C1$ , a drugi składa się z rezystora  $R22$  o mniejszej wartości połączonego szeregowo z układem równoległym rezystora  $R2$  o większej wartości i pojemności  $C2$ . Mostek bez zasilania jest niezrównoważony, natomiast poprzez zasilanie mostka uzyskuje się ogrzewanie i wzrost rezystancji przetwornika temperatury, co umożliwi zrównoważenie mostka. Jest to realizowane w procesie regulacji automatycznej z pętlą sprzężenia zwrotnego. Sygnał z przekątnej  $a-b$  mostka podawany jest do układu różnicowego  $S$  wytwarzającego sygnał błędny  $e$ . Sygnał błędny  $e$  doprowadzany jest do wejścia elektronicznego regulatora  $P$ , którego zadaniem jest zasilanie mostka  $AB$  takim napięciem  $u$ , aby minimalizować sygnał błędny  $e$ , a więc równoważyć mostek. W stanie ustalonym temperatura rezystancyjnego przetwornika temperatury utrzymywana jest na stałym poziomie, wyznaczonym za pomocą wartości rezystorów w mostku, zgodnie z zależnością (1):

$$R = \frac{R0(R2 + R22)}{R1 + R11} \quad (1)$$

W układzie rezystory  $R1$  i  $R2$  mają małą rezystancję, rzędu wartości rezystancji  $R0$  i  $R$ . Natomiast rezystory  $R11$  i  $R22$  mają rezystancję  $k$ -krotnie większą od odpowiednio  $R1$  i  $R2$ . Wartość współczynnika  $k$  wynosi od kilku do kilkudziesięciu, co pozwala na redukcję prądu płynącego w gałęzi biernej  $B$ , w stosunku do prądu płynącego w gałęzi czynnej  $A$ . Stosunek pojemności  $C1$  i  $C2$  dobiera się tak, aby w przybliżeniu spełniony był warunek kompensacji częstotliwościowej gałęzi  $B$  mostka (2):

$$\frac{C1}{C2} = \frac{R2}{R1} \quad (2)$$

Wartość pojemności  $C1$  i  $C2$  jest dobierana tak, aby była znacząco większa od pojemności pasywnych układu, oraz aby uzyskać znaczącą redukcję szumów generowanych przez rezystancje  $R1$  i  $R2$  poprzez równoległe przyłączenie do nich pojemności  $C1$  i  $C2$ . Ponadto regulacja stosunku pojemności (2) pozwala na optymalizację właściwości dynamicznych układu. Zwiększenie wartości stosunku (2) powoduje przyspieszenie reakcji układu na zaburzenie stanu równowagi, a zmniejszenie stosunku (2) powoduje spowolnienie tej reakcji.

Dla optymalizacji parametrów dynamicznych oba dwójniki gałęzi biernej mostka układu stałotemperaturowego złożone są z rezystora o mniejszej wartości połączonego szeregowo z układem równoległym rezystora o większej wartości i pojemności.

Zaproponowane rozwiązanie pozwala na uzyskanie rezystancji gałęzi biernej znacznie większej niż rezystancji gałęzi czynnej, co jest korzystne ze względów energetycznych, przy jednoczesnym zapewnieniu dobrych właściwości dynamicznych układu i redukcji szumów własnych dzięki zastosowaniu w gałęzi biernej mostka dwójników RC zawierających połączone równoległe elementy rezystancyjne i pojemnościowe.

#### 4. Podsumowanie

Anemometry z grzanym elementem pomiarowym stanowią przyrządy pomiarowe stosowane równoległe z optycznymi technikami pomiarowymi w badaniu przepływów w szerokim zakresie widma fluktuacji prędkości. Poziomy szum układu pomiarowego stanowi jedno z istotnych ograniczeń możliwości pomiarowych anemometrów termicznych. Dlatego istotnym elementem rozwoju tych technik jest prowadzenie badań zmierzających do redukcji poziomu szumów własnych aparatury. Proces ten może odbywać się dwutorowo – poprzez odpowiedni dobór i wykorzystanie nowoczesnych elementów elektronicznych, których parametry są nieustannie optymalizowane, oraz poprzez opracowywanie nowych metod i układów pomiarowych pozwalających na dalszą ekspansję możliwości badawczych aparatury termooanemometrycznej. Niniejszy artykuł stanowi przyczynek do tych działań. Opisana w artykule koncepcja jest obecnie na etapie wstępnym, natomiast dotychczasowe rezultaty o charakterze jakościowym pozwalają na przewidywanie możliwości jej zastosowania w aparaturze pomiarowej przeznaczonej do badań dynamicznych przepływów o złożonej charakterystyce widmowej. Dlatego przewiduje się dalsze badania zarówno w zakresie podstawowym, składające się z badań koncepcyjno-rozwojowych oraz pomiaru i optymalizacji parametrów, jak i dotyczące potencjalnych aplikacji.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na projekt badawczy 2017/25/B/ST8/00212: „Nowatorska metoda badania wysoko-amplitudowych, szybkozmiennych przepływów pulsacyjnych – modelowanie, optymalizacja i weryfikacja eksperymentalna”.

### Literatura

- [1] Elsner J.W.: *Turbulencja przepływów*. PWN, Warszawa, 1987.
- [2] Bruun H.H.: *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*. University Press, Oxford, 1995.
- [3] Freymuth P.: *Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers*. Rev. of Sci. Instrum., 38, 677-681, 1967.
- [4] Davis M.R.: *The dynamic response of constant resistance anemometers*. J. Phys. E: Sci. Instrum., 3, 15-20, 1970.
- [5] Freymuth P.: *Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers*. J. Phys. E: Sci. Instrum., 10, 705-710, 1977.
- [6] Watmuff J.H.: *Investigation of the Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer*. Exp. Thermal and Fluid Sci., 11, 117-134, 1995.
- [7] Saddoughi S.G., Veeravalli S.V.: *Hot-wire anemometry behaviour at very high frequencies*. Meas. Sci. Technol., 7, 1297-1300, 1996.
- [8] Freymuth P.: *On higher order dynamics of constant-temperature hot-wire anemometers*. Meas. Sci. Technol., 9, 534-535, 1998.
- [9] Payne S.J.: *Unsteady Loss in a High Pressure Turbine Stage*. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy at the University of Oxford, Hilary Term, Department of Engineering Science, University of Oxford, 2001.
- [10] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements*. Meas. Sci. Technol., 15, 1835-1847, 2004.
- [11] Li D.J.: *The effect of electronic components on the cut-off frequency of the hot-wire system*. Meas. Sci. Technol., 16, 766-774, 2005.
- [12] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system under various perturbations*. Meas. Sci. Technol., 17, 2665-2675, 2006.
- [13] Ligęza P.: *Constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 78, 2007.
- [14] Ligęza P.: *Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant-temperature anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 79, 2008.
- [15] Ligęza P.: *An investigation of a constant-bandwidth hot-wire anemometer*. Flow Measurement and Instrumentation, vol. 20, 2009.
- [16] Ligęza P.: *Static and dynamic parameters of hot-wire sensors in a wide range of filament diameters as a criterion for optimal sensor selection in measurement process*. Measurement, 151, 107177, 2020.
- [17] Ligęza P.: *Modification of Hot-Wire Anemometers Frequency Bandwidth Measurement Method*. Sensors, 20, 6, 1595, 2020.
- [18] Opis patentowy US 4523462A: Constant temperature anemometer having an enhanced frequency response, 1983.
- [19] Opis patentowy US 5493906A: Automatic offset control for constant temperature anemometer, 1994.
- [20] Opis patentowy PL 209493: Układ anemometru stałotemperaturowego z regulacją właściwości dynamicznych, 2011.

## **Modification of the bridge of a constant temperature anemometer for research in a wide range of flow velocity fluctuations**

### **Summary**

The hot-wire anemometric method used in the study of turbulent flows consists in measuring the physical quantities describing the flow by measuring thermal losses of a miniature heated element. The hot-wire anemometer enables measurements of fast-varying flows over a wide velocity range, with a good signal-to-noise ratio. The frequency response is of hundreds of kilohertz, and the measured velocity ranges is from centimeters per second to supersonic speeds. The article presents the concept of modification of the classic bridge of constant-temperature anemometer system intended for testing in a wide spectral range of flow velocity fluctuations. The essence of the proposed modification is, above all, to reduce the system's own noise while maintaining very good dynamic parameters. The system is designed to study turbulent flows with a wide frequency spectrum of velocity fluctuations.

**Keywords:** turbulent flows, constant-temperature anemometer, frequency response, system dynamics, self-noise