

# Modyfikacja metody wyznaczania pasma przenoszenia anemometru z nagrzanym elementem pomiarowym

PAWEŁ LIGĘZA

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

## Streszczenie

Pomiary fluktuacji prędkości stanowią główny obszar aplikacyjny termooanemometrów. Dlatego też wyznaczenie pasma przenoszenia termooanemometru stanowi ważne zagadnienie dla oceny jego właściwości metrologicznych. Standardowa, pośrednia metoda wyznaczania pasma przenoszenia termooanemometru polegająca na podłączeniu przewodowo do elektronicznego układu termooanemometrycznego periodycznego, testującego sygnału napięciowego. Na podstawie odpowiedzi termooanemometru na taki sygnał można oszacować pasmo przenoszenia termooanemometru. W artykule proponuje się modyfikację metody z periodycznym sygnałem testującym. Modyfikacja polega na bezprzewodowym doprowadzeniu elektrycznego sygnału testującego do czujnika pomiarowego poprzez transformatorowe sprzężenie indukcyjne.

**Słowa kluczowe:** fluktuacje prędkości, anemometr stałotemperaturowy, pasmo przenoszenia, częstotliwość graniczna

## 1. Wprowadzenie

Anemometry z grzanym elementem pomiarowym (termooanemometry) stanowią grupę przyrządów pomiarowych przeznaczonych do pomiaru prędkości przepływu płynów (cieczy i gazów). W przyrządach tych pomiar prędkości przepływu dokonywany jest metodą pośrednią, poprzez pomiar strat ciepłych nagrzanego czujnika pomiarowego umieszczonego w badanym przepływie. Czujnik pomiarowy stanowi cienki drut, folia, termistor, lub inny element nagrzewany najczęściej płynącym przez niego prądem elektrycznym. Strumień ciepła przekazywany z czujnika do przepływu jest zależny od mierzonej prędkości przepływu. Prędkość ta wyznaczana jest na podstawie bilansu strumieni ciepła dostarczanych i odprowadzanych z czujnika. Czujnik pomiarowy współpracuje z elektronicznym układem termooanemometrycznym, który zadaje warunki pracy czujnika i wytwarza sygnał wyjściowy, stanowiący miarę prędkości przepływu. W zależności od zadanych warunków pracy czujnika rozróżnia się podstawowe typy termooanemometrów: stałoprądowe, stałonapięciowe oraz stałotemperaturowe. Termooanemometry posiadają szereg cech, które wyróżniają je z innych grup przyrządów do pomiaru prędkości przepływu. Do cech tych zaliczamy szeroki zakres mierzonych prędkości, niewielkie rozmiary czujnika, małą inwazyjność pomiaru, pomiar zbliżony do punktowego, brak elementów ruchomych, elektryczny sygnał wyjściowy oraz szerokie częstotliwościowe pasmo przenoszenia sygnałów przy dobrym stosunku sygnału do szumu. Termooanemometry umożliwiają pomiar fluktuacji prędkości przepływów szybkozmiennych w paśmie sięgającym setek kiloherców. Pomiary fluktuacji prędkości stanowią główny obszar aplikacyjny termooanemometrów. Dlatego też wyznaczenie pasma przenoszenia termooanemometru stanowi ważne zagadnienie dla oceny jego właściwości metrologicznych.

Tematyka związana z zastosowaniem termooanemometrów w pomiarach przepływów szybkozmiennych i turbulentnych była podejmowana w literaturze wielokrotnie. Teorię anemometru stałotemperaturowego jako układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym podał Freymuth [1]. Teoria ta ogranicza się do analizy pracy układu dla małych sygnałów. Pasma przenoszenia anemometru stałotemperaturowego poddał analizie w swojej

pracy Davis [2]. Badał on prosty model dynamiczny drugiego rzędu. Freymuth w pracy [3] zaproponował metodę testowania pasma przenoszenia termoanemometru za pomocą elektrycznego sygnału prostokątnego, oraz podał zależność pozwalającą na oszacowanie częstotliwości granicznej układu. Freymuth w [3] wykazał także, że poprawnie zestrojony anemometr może być dobrze opisany modelem dynamicznym trzeciego rzędu. Komputerową symulację pracy złożonych systemów termoanemometrycznych przedstawił w swojej pracy Watmuff [4]. Określił on czynniki decydujące o paśmie przenoszenia anemometru. Zachowanie anemometru w zakresie bardzo wysokich częstotliwości analizowali w swojej pracy Saddoughi i Veeravalli [5]. Wykazali oni, że pasmo przenoszenia jest limitowane przez szумы własne układu. Krytyczny przegląd literatury anemometrycznej dotyczącej efektów dynamicznych rzędu wyższego niż trzeci podał Freymuth [6]. Natomiast Payne [7] zaprezentował teoretyczną analizę częstotliwościowej odpowiedzi anemometru. Wykazał on, że ze względu na istnienie przewodzenia ciepła z włókna do wsporników istnieje konieczność korekcji charakterystyki częstotliwościowej anemometru już dla częstotliwości rzędu pojedynczych herców. Efekt ten analizował w swojej pracy także Li [8]. Ponadto badał on także wpływ elementów elektronicznych na częstotliwość graniczną układu [9], oraz różne rodzaje wymuszeń stosowanych do wyznaczenia pasma przenoszenia anemometru [10].

## 2. Regulacja anemometru i wyznaczenie pasma przenoszenia

Typowym układem pracy anemometru z grzanym włóknem jest układ stałotemperaturowy. Jest to elektroniczny układ automatycznej regulacji, który utrzymuje średnią temperaturę włókna czujnika na stałym, zadanym poziomie. Układ stałotemperaturowy zawiera układ komparacji rezystancji oraz regulator pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego. W takim układzie prąd czujnika jest funkcją strat cieplnych włókna pomiarowego, a więc pośrednio mierzonej prędkości przepływu. Klasyczny termoanemometr stałotemperaturowy umożliwia pomiar szybkozmiennych fluktuacji prędkości przepływu, jednak jego pasmo przenoszenia jest funkcją prędkości przepływu. W przepływach, w których prędkość średnia nie zmienia się znacząco nie stanowi to istotnej wady tej metody pomiarowej. Jednak w przepływach, w których prędkość średnia zmienia się w szerokim zakresie może to stanowić źródło znaczących błędów dynamicznych. Ligęza [11-14] 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.

Pomiary przepływów szybkozmiennych i turbulentnych wymagają dokonania regulacji właściwości dynamicznych anemometru stałotemperaturowego, mającej na celu kształtowanie pasma przenoszenia anemometru. Kształtowanie pasma przenoszenia może być zrealizowane w następujących trybach:

- manualna regulacja pasma przenoszenia anemometru,
- automatyczna regulacja pasma przenoszenia anemometru,
- regulacja adaptacyjna anemometru.

W termoanemometrycznych komputerowych systemach pomiarowych regulacja pasma przenoszenia może być dokonywana automatycznie. System pomiarowy na podstawie analizy sygnału mierzonego dobiera nastawy układu stałotemperaturowego optymalnie do warunków pomiarowych. Możliwe jest także wprowadzenie do układu stałotemperaturowego regulatora adaptacyjnego działającego w taki sposób, aby uzyskać możliwie stałe pasmo przenoszenia anemometru w funkcji prędkości przepływu. Jest to realizowane poprzez zastosowanie drugiej pętli sprzężenia zwrotnego. W pętli tej sygnał wyjściowy z anemometru steruje parametrami regulatora tak, aby zarówno dla małych jak i dla dużych prędkości pasmo przenoszenia było zbliżone.

Niezależnie od zastosowanej metody kształtowania pasma, regulację anemometru stałotemperaturowego przeprowadza się najczęściej w taki sposób, aby dla największej mierzonej prędkości uzyskać możliwie szerokie pasmo przenoszenia, przy zapewnieniu płaskiej charakterystyki częstotliwościowej oraz stabilnej pracy anemometru. Tak więc dla przeprowadzenia regulacji i optymalizacji dynamicznej anemometru niezbędna jest procedura umożliwiająca wyznaczenie pasma przenoszenia anemometru dla różnych nastaw parametrów systemu pomiarowego.

### 3. Klasyczne metody wyznaczania pasma przenoszenia anemometru oraz proponowana modyfikacja

W praktyce stosuje się dwie odrębne metody wyznaczania pasma przenoszenia termooanemometru. Pierwsza to metoda bezpośrednia, polegająca na wytworzeniu przepływu płynu o zadawanej częstotliwości i amplitudzie fluktuacji, oraz wyznaczeniu odpowiedzi anemometru na sygnał pomiarowy w określonym zakresie częstotliwości. Ta metoda ma jednak bardzo ograniczone zastosowanie, ze względu na podstawową trudność wytworzenia fluktuacji przepływu o zadanych parametrach amplitudowo-częstotliwościowych. Druga metoda wyznaczania pasma przenoszenia termooanemometru to metoda pośrednia, polegająca na podłączeniu przewodowo do elektronicznego układu termooanemometrycznego periodycznego, testującego sygnału napięciowego. Jest to najczęściej sygnał o kształcie prostokątnym, stałej częstotliwości i małej amplitudzie, który powoduje niewielką, cykliczną zmianę parametrów pracy układu elektronicznego oraz poziomu nagrzania czujnika. Na podstawie odpowiedzi termooanemometru na taki sygnał można oszacować pasmo przenoszenia termooanemometru. Wadą tej metody jest konieczność doprowadzenia periodycznego sygnału napięciowego przewodowo bezpośrednio do elektronicznego układu termooanemometrycznego. Wymaga to ingerencji w układ elektroniczny przyrządu oraz może wpływać na parametry pracy układu elektronicznego. Ponadto w przypadku stosowanego powszechnie sygnału prostokątnego najczęściej szacowana jest tylko częstotliwość graniczna przyrządu bez określania kształtu całego pasma przenoszenia. Mankamentem jest również to, że testujący sygnał periodyczny doprowadzany jest do układu elektronicznego, a nie do czujnika.

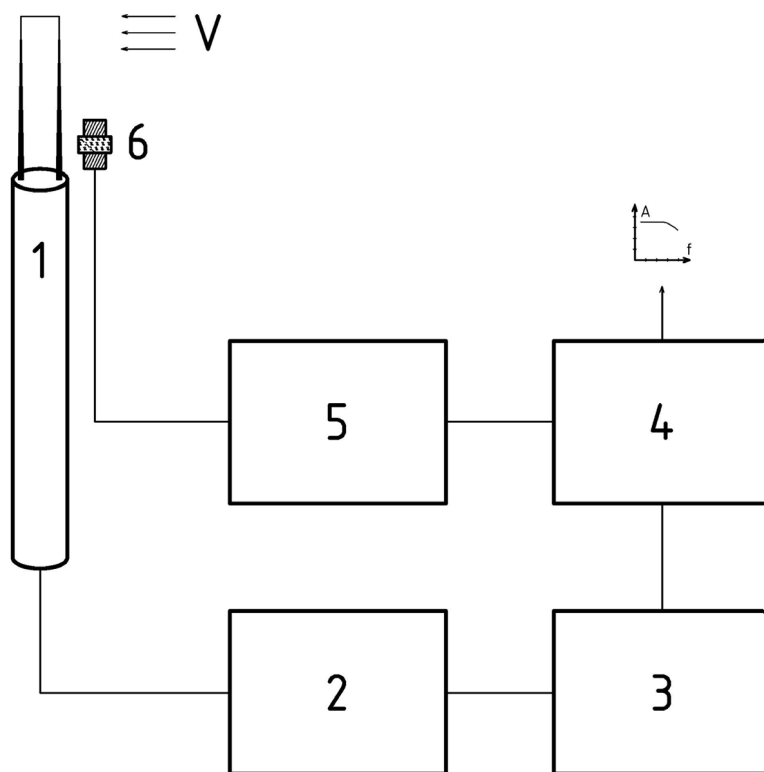
Autor proponuje modyfikację metody z periodycznym sygnałem testującym. Modyfikacja polega na bezprzewodowym doprowadzeniu elektrycznego sygnału testującego do czujnika pomiarowego poprzez transformatorowe sprzężenie indukcyjne. W metodzie zmodyfikowanej testujący periodyczny sygnał o regulowanej częstotliwości doprowadza się do cewki indukcyjnej umieszczonej w pobliżu czujnika termooanemometrycznego. Cewka może być wyposażona w rdzeń, może również stanowić integralną część czujnika termooanemometrycznego. Z cewki indukcyjnej poprzez transformatorowe sprzężenie indukcyjne sygnał testujący doprowadza się do czujnika termooanemometrycznego. Sygnał ten o zadanej częstotliwości indukowany w czujniku termooanemometrycznym powoduje niewielką periodyczną zmianę parametrów nagrzania czujnika. W procesie pomiaru pasma zmienia się częstotliwość sygnału testującego, a dla każdej zadanej częstotliwości mierzy się amplitudę względną składowej zmiennej sygnału wyjściowego z układu termooanemometrycznego. Pasma przenoszenia termooanemometru przedstawia się w postaci wykresu zależności zmierzonej amplitudy od częstotliwości sygnału testującego. W podstawowym wariacie metody stosuje się sinusoidalny sygnał testujący o stałej amplitudzie w całym badanym zakresie częstotliwości.

### 4. Układ do wyznaczania pasma przenoszenia anemometru metodą zmodyfikowaną

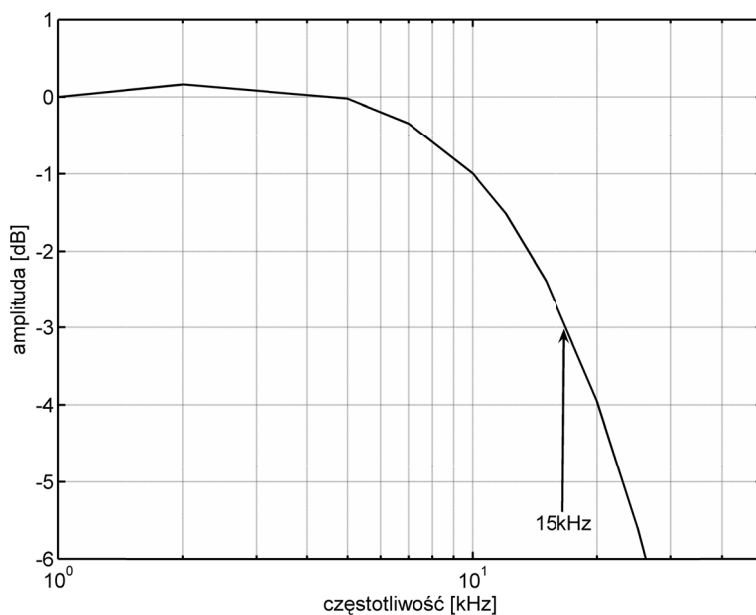
Na rysunku 1 przedstawia schematycznie proponowany układ do wyznaczania pasma przenoszenia termooanemometru metodą zmodyfikowaną.

Układ składa się z czujnika termooanemometrycznego 1, połączonego z nim elektronicznego stałotemperaturowego układu termooanemometrycznego 2 oraz zawiera cewkę indukcyjną 6 umieszczoną w pobliżu czujnika termooanemometrycznego 1 i sprzężoną z czujnikiem 1 poprzez indukcyjne sprzężenie transformatorowe. Czujnik 1 umieszczony jest w przepływie o prędkości  $V$ . Cewka 6 zasilana jest z generatora 5 periodycznym elektrycznym sygnałem testującym. Procesem pomiarowym steruje system komputerowy 4, który przestraja generator 5 w zadanym zakresie częstotliwości oraz rejestruje amplitudy sygnału wyjściowego z termooanemometru. Amplitudy te mierzone są w bloku pomiarowym 3. Standardowy proces pomiarowy polega na zasilaniu cewki 6 z generatora 5 periodycznym sygnałem testującym o stałej amplitudzie i regulowanej częstotliwości. System komputerowy 4 sterujący procesem wyznaczania pasma przenoszenia termooanemometru zmienia częstotliwość generatora w zadanym zakresie, a układ pomiaru amplitudy 3 wyznacza dla każdej częstotliwości amplitudę względną  $A$  składowej zmiennej sygnału wyjściowego z termooanemometru. Wykres zależności zmierzonej amplitudy  $A$  od częstotliwości  $f$  sygnału testującego obrazuje pasmo przenoszenia termooanemometru.

Na rysunku 2. przedstawiono przykładowe wyznaczone opisaną metodą pasmo przenoszenia termooanemometru stałotemperaturowego dla przepływu powietrza o prędkości  $V = 1$  m/s, czujnika wolframowego



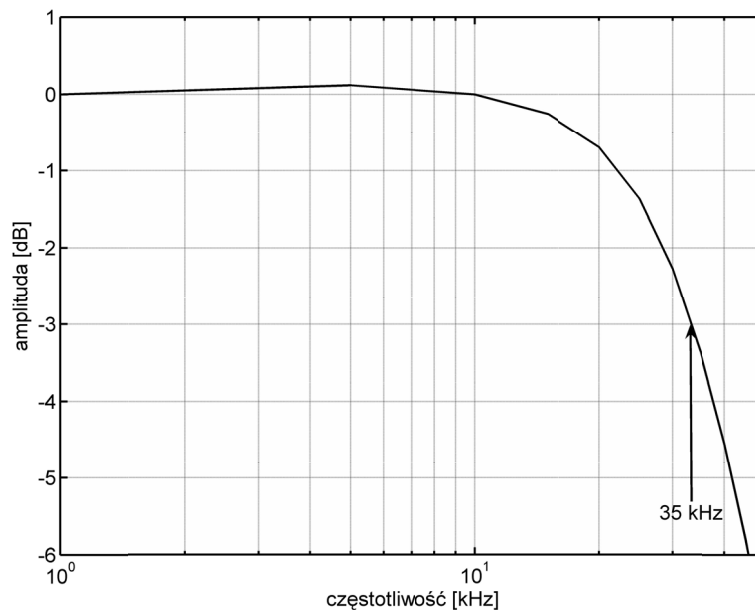
Rys. 1. Zmodyfikowany układ do wyznaczenie pasma przenoszenia anemometru



Rys. 2. Wyznaczone pasmo przenoszenia termooanemometru dla prędkości przepływu  $V = 1$  m/s; częstotliwość graniczna wynosi 15 kHz

o średnicy włókna 5 mikrometrów i rezystancji w temperaturze otoczenia 5 omów, przy współczynniku nagrzania włókna 1,8. Zaznaczona strzałką na rysunku 2 3-decybelowa częstotliwość graniczna termooanemometru dla tych warunków pracy wynosi około 15 kHz.

Na rysunku 3. przedstawiono przykładowe wyznaczone pasmo przenoszenia termooanemometru stałotemperaturowego dla przepływu powietrza o prędkości  $V = 10$  m/s, czujnika wolframowego o średnicy włókna 5 mikrometrów i rezystancji w temperaturze otoczenia 5 omów, przy współczynniku nagrzania włókna 1,8. Zaznaczona strzałką na rysunku 3 3-decybelowa częstotliwość graniczna termooanemometru dla tych warunków pracy wynosi około 35 kHz.



Rys. 3. Wyznaczone pasmo przenoszenia termooanemometru dla prędkości przepływu  $V = 10$  m/s; częstotliwość graniczna wynosi 35 kHz

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono koncepcję i wyniki wstępnych prac nad modyfikacją metody wyznaczania pasma przenoszenia anemometru z nagrzanym elementem pomiarowym. Zaproponowana modyfikacja metody wyznaczania pasma przenoszenia termooanemometru dzięki zastosowaniu indukcyjnego sprzężenia transformatorowego pomiędzy sygnałem testującym, a czujnikiem termooanemometrycznym charakteryzuje się brakiem bezpośredniego, przewodowego doprowadzania sygnału testującego do układu elektronicznego przyrządu oraz redukcją wpływu układu testującego na parametry pracy układu elektronicznego. Może więc zostać zastosowane do każdego termooanemometru, bez konieczności ingerencji w układ elektroniczny przyrządu. Metoda pozwala na wyznaczenia kształtu całego pasma przenoszenia termooanemometru. W metodzie testujący sygnał periodyczny doprowadzany jest bezpośrednio do czujnika, a nie do układu elektronicznego termooanemometru. Wstępne rezultaty potwierdzają możliwość zastosowania takiej modyfikacji w praktyce. Uzyskane wyniki pomiarowe są zbieżne z prowadzonymi badaniami własnymi oraz danymi literaturowymi [15,16]. Metoda wymaga dalszych szczegółowych badań, w szczególności porównania z wynikami badań symulacyjnych i doświadczalnych oraz systematycznej weryfikacji.

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] Freymuth P.: *Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers*. Rev. of Sci. Instrum. 1967; 38: 677-681.
- [2] Davis M.R.: The dynamic response of constant resistance anemometers. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1970; 3: 15-20.
- [3] Freymuth P.: *Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers*. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1977; 10: 705-710.
- [4] Watmuff J.H.: *Investigation of the Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer*. Exp. Thermal and Fluid Sci. 1995; 11: 117-134.
- [5] Saddoughi S.G.: Veeravalli S.V. *Hot-wire anemometry behaviour at very high frequencies*. Meas. Sci. Technol. 1996; 7: 1297-1300.
- [6] Freymuth P.: *On higher order dynamics of constant-temperature hot-wire anemometers*. Meas. Sci. Technol. 1998; 9, 534-535.

- [7] 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 [http://www.robots.ox.ac.uk/~sjp/publns/sjp\\_thesis\\_c4\\_chapter4.pdf](http://www.robots.ox.ac.uk/~sjp/publns/sjp_thesis_c4_chapter4.pdf).
- [8] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements*. Meas. Sci. Technol. 2004; 15: 1835-1847.
- [9] Li D.J.: *The effect of electronic components on the cut-off frequency of the hot-wire system*. Meas. Sci. Technol. 2005; 16: 766-774.
- [10] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system under various perturbations*. Meas. Sci. Technol. 2006; 17: 2665-2675.
- [11] Ligęza P.: *Constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 78, 2007.
- [12] Ligęza P.: *Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant-temperature anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 79, 2008.
- [13] Ligęza P.: *An investigation of a constant-bandwidth hot-wire anemometer*. Flow Measurement and Instrumentation, vol. 20, 2009.
- [14] Ligęza P.: *Sposób kształtowania pasma przenoszenia anemometru stalotemperaturowego z kompensacją częstotliwości oraz anemometr z kompensacją częstotliwości*. Zgłoszenie patentowe PL 208852, 2006.
- [15] Elsner J.W.: *Turbulencja przepływów*. PWN, Warszawa, 1987.
- [16] Bruun H.H.: *Hot-wire Anemometry*. Principles and Signal Analysis; University Press, Oxford, 1995.

## **Modification of the method of determining the frequency response of the anemometer with the heated measuring element**

### **Abstract**

Measurements of gas velocity fluctuations constitute the main application area of hot-wire anemometers. Therefore, determining the frequency response of the hot-wire anemometer is an important issue for the assessment of its metrological properties. A standard, indirect method of determining the frequency response of an anemometer consists of use of a periodic testing signal connected directly to the anemometer circuit. Based on the response of the anemometer to such a signal, the frequency response can be estimated. The article proposes to modify the method with a periodic test signal. The modification consists in wireless connection of the electrical test signal to the measuring sensor via transformer inductive coupling.

**Keywords:** velocity fluctuations, constant-temperature anemometer, frequency response, frequency bandwidth