

Metoda eliminacji zakłóceń elektromagnetycznych w pomiarach termooanemometrycznych

PAWEŁ LIGĘZA, PAWEŁ JAMRÓZ, PIOTR OSTROGÓRSKI, ELŻBIETA POLESZCZYK

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

Streszczenie

Podstawowy obszar aplikacyjny termooanemometrów stanowią pomiary fluktuacji prędkości przepływu gazów w szerokim spektrum częstotliwości. Istotną cechą termooanemometrycznych systemów pomiarowych jest więc możliwie duże pasmo przenoszenia sygnału pomiarowego. Standardowo szerokie pasmo przenoszenia uzyskuje się poprzez zastosowanie stałotemperaturowego trybu pracy anemometru. W trybie tym temperatura grzanego elementu pomiarowego utrzymywana jest na stałym poziomie dzięki zastosowaniu układu elektronicznego ze sprzężeniem zwrotnym. Pasma przenoszenia dla termooanemometrów stałotemperaturowych może sięgać setek kiloherców. Ponieważ czujnik termooanemometryczny stanowi pod względem elektrycznym rodzaj pętli indukcyjnej, mogą indukować się w nim zakłócenia elektromagnetyczne. Duże wzmocnienie oraz szerokie pasmo przenoszenia układu stałotemperaturowego powodują, że w przypadku występowania zakłóceń elektromagnetycznych udział sygnałów niepożądanych w sygnale wyjściowym termooanemometru może być znaczący. W pracy tej przedstawiono koncepcję metody eliminacji tych zakłóceń.

Słowa kluczowe: anemometr stałotemperaturowy, fluktuacje prędkości, pasmo przenoszenia, zakłócenia elektromagnetyczne, eliminacja zakłóceń

1. Wprowadzenie

Termooanemometry to przyrządy do pomiaru prędkości przepływu płynów (cieczy i gazów), w których pomiar prędkości przepływu dokonywany jest metodą pośrednią, poprzez pomiar strat cieplnych nagrzanego czujnika pomiarowego umieszczonego w badanym przepływie. 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 wymusza warunki pracy czujnika i wytwarza sygnał wyjściowy, stanowiący miarę prędkości przepływu. Termooanemometry posiadają unikatowe właściwości, wyróżniające je z innych grup przyrządów anemometrycznych [1,2]. Możemy zaliczyć tu szeroki zakres mierzonych prędkości, niewielkie rozmiary czujnika, małą inwazyjność pomiaru, pomiar zbliżony do punktowego, brak ruchomych elementów czujnika, elektryczny sygnał wyjściowy, oraz szerokie częstotliwościowe pasmo przenoszenia sygnałów przy korzystnym stosunku sygnału do szumu [3-5]. Często stosowanym układem pracy termooanemometru jest układ stałotemperaturowy, umożliwiający pomiar fluktuacji prędkości przepływów szybkozmiennych w paśmie sięgającym setek kiloherców [6-9]. Ponieważ czujnik termooanemometryczny stanowi pod względem elektrycznym rodzaj pętli indukcyjnej, mogą indukować się w nim zakłócenia elektromagnetyczne. Duże wzmocnienie oraz szerokie pasmo przenoszenia układu stałotemperaturowego powodują, że w przypadku występowania zakłóceń elektromagnetycznych udział sygnałów niepożądanych w sygnale wyjściowym termooanemometru może być znaczący. Dlatego istotnym zagadnieniem w pomiarach termooanemometrycznych jest opracowanie metody ograniczenia lub eliminacji tych zakłóceń. Artykuł przedstawia koncepcję takiej metody, opartej o wyposażenie czujnika w pętlę indukcyjną do pomiaru zakłóceń [10].

2. Termoanemometryczne systemy pomiarowe

Termoanemometryczny system pomiarowy składa się z czujnika termoanemometrycznego oraz elektronicznego układu zasilania czujnika i przetwarzania sygnału na sygnał elektryczny będący miarą badanej prędkości przepływu. Podstawowym elementem czujnika termoanemometrycznego jest umieszczony w przepływie, przewodzący, nagrzewany cienki drut (włókno), folia lub inny element czynny o rezystancji zależnej od temperatury. Jest on nagrzewany prądem elektrycznym, a jego temperatura mierzona jest najczęściej poprzez pomiar jego rezystancji. Strumień ciepła przekazywany do przepływu zależy od prędkości medium. Na podstawie bilansu cieplnego elementu czynnego czujnika termoanemometrycznego wyznaczana jest prędkość przepływu. Elektroniczny układ zasilania czujnika i przetwarzania sygnału steruje wartością prądu czujnika, dokonuje pomiaru jego rezystancji i wytwarza elektryczny sygnał wyjściowy stanowiący miarę badanej prędkości. Stosowane są różne tryby zasilania czujnika termoanemometrycznego. Rozróżnia się układ stałoprądowy, stałonapięciowy, stałotemperaturowy, układy impulsowe i inne tryby pracy. Jednym z podstawowych trybów jest stałotemperaturowy, zasilający czujnik prądem o takiej wartości, aby temperatura elementu czynnego czujnika utrzymywana była na zadanym poziomie, niezależnie od warunków odbierania ciepła. Funkcja ta realizowana jest w elektronicznym układzie wzmacniacza i regulatora ze sprzężeniem zwrotnym. W układzie stałotemperaturowym wartość prądu czujnika stanowi miarę prędkości przepływu. Zaletą tego układu jest szerokie pasmo częstotliwości przenoszonych fluktuacji przepływu, sięgające setek kiloherców. Typowy czujnik termoanemometryczny zbudowany jest z włókna (elementu czynnego), lub układu włókien pomiarowych, rozpiętych na metalowych wspornikach. Wsporniki doprowadzają sygnał elektryczny oraz stanowią elementy mocowania włókna. Konstruuje się czujniki termoanemometryczne jednowłóknowe i wielowłóknowe o różnorodnej konfiguracji włókien, a także wyposażone w termometr służący do kompensacji wpływu temperatury na pomiar.

3. Zakłócenia elektromagnetyczne w pomiarach termoanemometrycznych

Wadą czujnika termoanemometrycznego jest to, że włókno wraz ze wspornikami stanowi rodzaj pętli indukcyjnej, w której mogą indukować się zakłócenia elektromagnetyczne. Zakłócenia te przenoszą się w układzie elektronicznym termoanemometru na sygnał wyjściowy zaburzając pomiar. Ponieważ układ elektroniczny termoanemometru stałotemperaturowego cechuje duże wzmocnienie, szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości oraz nieliniowość, nawet niewielki sygnał elektromagnetyczny, w szczególności zakłócenia impulsowe, powodują duże zakłócenie sygnału wyjściowego termoanemometru. W celu ograniczenia zakłóceń stosuje się ekranowanie korpusu czujnika, kabla zasilającego i układu elektronicznego. Natomiast w większości przypadków element czynny czujnika wraz ze wspornikami nie może być ekranowany, ponieważ ekran zaburzałby badany przepływ. Jedynym stosowanym rozwiązaniem jest filtracja sygnału wyjściowego. Jednak metoda ta ma ograniczoną skuteczność, ponieważ podstawowym problemem jest trudność rozróżnienia w sygnale wyjściowym fluktuacji związanych ze zmianą prędkości od fluktuacji zakłóceń. Ponadto nieliniowość układu powoduje wzajemne oddziaływanie sygnałów.

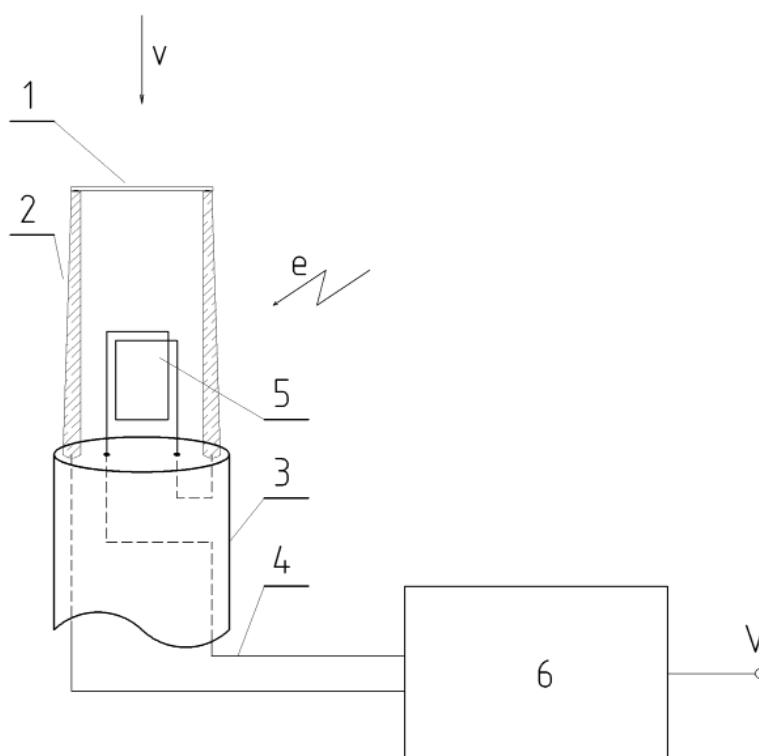
4. Koncepcja metody eliminacji zakłóceń elektromagnetycznych w pomiarach termoanemometrycznych

W celu ograniczenia lub eliminacji zakłóceń elektromagnetycznych autor proponuje specjalną konstrukcję czujnika termoanemometrycznego wyposażonego w pętlę kompensacyjną zakłóceń elektromagnetycznych. Czujnik zbudowany jest z elementu czynnego (włókna) rozpiętego na wspornikach. Włókno umieszczone jest w badanym przepływie i nagrzewane jest prądem elektrycznym z układu termoanemometrycznego układu zasilania czujnika. Czujnik wyposażony jest w dodatkowy element stanowiący kompensacyjną pętlę indukcyjną. Pętla wykonana jest z przewodnika o znikomej w porównaniu z włóknem rezystancji i umieszczona jest w pobliżu wsporników i włókna czujnika. W obecności zakłóceń elektromagnetycznych indukujących się w układzie włókno-wsporniki, zakłócenia te jednocześnie indukują się w dodatkowej pętli. Poprzez połączenie szeregowo dodatkowej pętli z obwodem włókna w taki sposób, aby indukowane zakłócenia występowały w przeciwnej fazie, zakłócenia te są redukowane. Dzięki za-

stosowaniu pętli kompensacyjnej do układu elektronicznego dociera przewodem ekranowanym sygnał o znacznie obniżonym poziomie zakłóceń. Możliwe też jest doprowadzenie sygnału z dodatkowej pętli przewodem ekranowanym do układu elektronicznego, który zrealizuje funkcję odjęcia sygnału zakłócającego od sygnału termooanemometrycznego w taki sposób, aby zminimalizować poziom zakłóceń sygnału wyjściowego. Dodatkowa pętla kompensacyjna dobrana dla danego czujnika może mieć stałe parametry. Dla optymalizacji procesu redukcji zakłóceń możliwe też jest zastosowanie pętli o regulowanej indukcyjności i położeniu. Rozwiązanie to pozwala na redukcję zakłóceń elektromagnetycznych w pomiarach termooanemometrycznych. Jest to szczególnie istotne w pomiarach przepływów w obecności silnych zakłócających pól elektromagnetycznych pochodzących od maszyn elektrycznych komutatorowych, styczników, sterowników tyrystorowych i układów impulsowych.

5. Konstrukcja czujnika z pętlą eliminacji zakłóceń elektromagnetycznych

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie koncepcję konstrukcji czujnika termooanemometrycznego z pętlą kompensacyjną zakłóceń elektromagnetycznych.



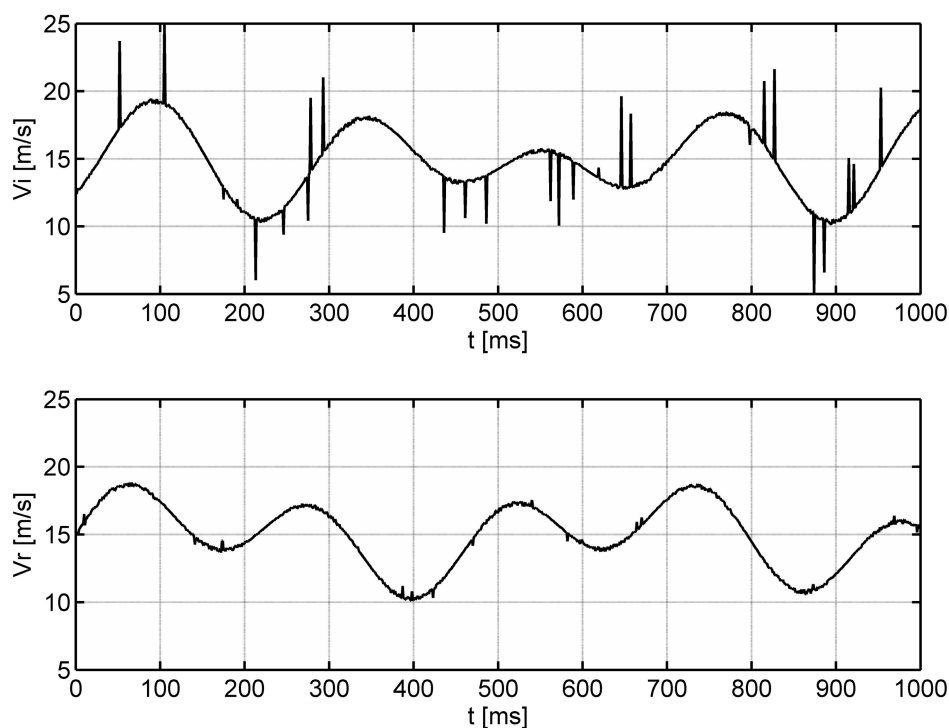
Rys. 1. Czujnik termooanemometryczny z pętlą kompensacyjną zakłóceń elektromagnetycznych

Czujnik ten zbudowany jest z elementu czynnego 1 stanowiącego włókno pomiarowe, wykonane z wolframu, platyny lub innego materiału przewodzącego o dużym temperaturowym współczynniku rezystancji. Włókno rozpięte jest na wspornikach 2, wykonanych ze stali lub innego materiału przewodzącego. Wsporniki stanowią doprowadzenia elektryczne do włókna oraz element mocowania mechanicznego włókna. Górne końce wsporników połączone są z włóknom technologią zgrzewania lub lutowania albo klejenia przewodzącego. Dolne końce wsporników umieszczone są w izolatorze wewnętrznym korpusu czujnika 3. Korpus czujnika 3 i kabel połączeniowy 4 są ekranowane. Czujnik umieszczony jest w badanym przepływie o prędkości v . Jednocześnie na czujnik oddziałuje zakłócające pole elektromagnetyczne e , indukujące prąd zakłócający w obwodzie wsporniki – włókno. Z czujnikiem zintegrowana jest dodatkowa pętla indukcyjna 5, umocowana na izolatorze korpusu czujnika pomiędzy wspornikami. Pętla 5 wykonana jest z drutu miedzianego lub innego przewodnika. Rezystancja pętli 5 jest mała w porównaniu z rezystancją włókna. Pętla 5 wykonana jest w postaci jednego lub więcej zwojów drutu. Czujnik połączony jest z elektronicznym

układem termooanemometrycznym 6 ekranowanym kablem 4 w taki sposób, że dolny koniec jednego ze wsporników połączony jest bezpośrednio do jednego z przewodów kabla 4, natomiast dolny koniec drugiego wspornika połączony jest z jednym końcem pętli 5, a drugi koniec pętli 5 połączony jest do drugiego przewodu kabla 4. Tak więc włókno 1 połączone jest szeregowo z pętlą 5. Możliwe jest również zastosowanie czteroprzewodowego kabla zasilającego o rozdzielonych doprowadzeniach prądowych i napięciowych. W pętli 5 indukuje się również prąd zakłócający od pola elektromagnetycznego e . Kształt, ilość zwojów i ustawienie przestrzenne pętli 5 dobiera się doświadczalnie w taki sposób, aby prądy zakłócające włókna i pętli miały zbliżony przebieg i przeciwne zwroty. W takiej konfiguracji uzyskuje się redukcję zakłóceń pochodzących od zewnętrznego pola elektromagnetycznego w pomiarze termooanemometrycznym. Możliwe jest również doprowadzenie sygnału z dodatkowej pętli przewodem ekranowanym do układu elektronicznego 6, który zrealizuje funkcję odjęcia sygnału zakłócającego od sygnału termooanemometrycznego w taki sposób, aby zminimalizować poziom zakłóceń sygnału wyjściowego. Dodatkowa pętla kompensująca dobrana dla danego czujnika może mieć stałe parametry. Dla optymalizacji procesu redukcji zakłóceń możliwe też jest zastosowanie pętli o regulowanej indukcyjności i położeniu, przez zmianę kształtu i umieszczenia przestrzennego zwojów drutu miedzianego. Do pomiarów w cieczach lub środowisku agresywnym elementy czujnika 1 i 2 oraz pętla 5 mogą być pokryte cienkim zewnętrznym materiałem izolacyjnym, na przykład ceramicznym. Czujnik termooanemometryczny zasilany jest z elektronicznego układu zasilania 6 pracującego w trybie stałotemperaturowym lub innym trybie termooanemometrycznym. Sygnałem wyjściowym z układu termooanemometrycznego 6 jest sygnał V stanowiący miarę badanej prędkości przepływu.

6. Wstępne badania pilotażowe

W celu weryfikacji koncepcji przedstawionej metody wykonano pilotażowe badania wstępne z wykorzystaniem standardowego czujnika termooanemometrycznego i zewnętrznej dodatkowej pętli kompensacyjnej. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe przebiegi sygnału wyjściowego V dla pomiaru termooanemometrycznego standardowym czujnikiem bez pętli kompensującej zakłócenia – przebieg V_i , oraz czujnikiem z pętlą kompensacyjną – przebieg V_r . Przebieg zmian prędkości generowany jest poprzez sterowanie silnika napędu w tunelu aerodynamicznym, a zakłócenia elektromagnetyczne pochodzą z układu tyrystorowego. Widoczna jest znacząca redukcja poziomu zakłóceń uzyskana za pomocą czujnika z pętlą kompensacyjną zakłóceń elektromagnetycznych.



Rys. 2. Termooanemometryczne sygnały pomiarowe wykonane standardowym czujnikiem – przebieg V_i , oraz czujnikiem z pętlą kompensacyjną – przebieg V_r

7. Wnioski

Ważnym problemem w pomiarach termooanemometrycznych przepływów szybkozmiennych o szerokim częstotliwościowym spektrum fluktuacji jest ograniczenie lub eliminacja zakłóceń elektromagnetycznych. Jest to szczególnie istotne w pomiarach w obecności silnych zakłócających pól elektromagnetycznych pochodzących od maszyn elektrycznych komutatorowych, styczników, sterowników tyrystorowych i układów impulsowych [11,12]. Artykuł przedstawia koncepcję metody redukcji zakłóceń, opartej o wyposażenie czujnika termooanemometrycznego w pętlę indukcyjną do pomiaru zakłóceń. Czujnik taki zbudowany jest z elementu czynnego, stanowiącego włókno pomiarowe, rozpiętego na wspornikach stanowiących doprowadzenia elektryczne do włókna oraz element mocowania mechanicznego włókna, przy czym z czujnikiem zintegrowana jest pętla indukcyjna, przeznaczona do kompensacji zakłóceń elektromagnetycznych indukowanych w obwodzie wsporników i włókna, wykonana z drutu miedzianego lub innego przewodnika. Rezystancja pętli kompensacyjnej wykonanej w postaci jednego lub kilku zwojów drutu jest mała w porównaniu z rezystancją włókna. W podstawowym układzie eliminacji zakłóceń pętla kompensacyjna zakłóceń elektromagnetycznych połączona jest szeregowo z włóknom pomiarowym. Kształt, ilość zwojów i ustawienie przestrzenne pętli dobrane jest doświadczalnie w taki sposób, aby prądy zakłócające włókna i pętli miały zbliżony przebieg i przeciwne zwroty. W innym wariantcie metody sygnał z pętli kompensacyjnej może być doprowadzony do termooanemometrycznego układu elektronicznego, który, poprzez odejmowanie sygnałów napięciowych, realizuje funkcję odjęcia sygnału zakłócającego z pętli kompensacyjnej od sygnału termooanemometrycznego w taki sposób, aby zminimalizować poziom zakłóceń sygnału wyjściowego. Pętla kompensacyjna zakłóceń elektromagnetycznych może mieć regulowaną indukcyność i położenie, przez zmianę kształtu i umieszczenia przestrzennego zwojów drutu. Badania pilotażowe wskazują na potencjalną możliwość zastosowania przedstawionej metody w celu optymalizacji jakości pomiarów termooanemometrycznych. Dotyczy to zarówno przyrządów standardowych [2,4,6,8,9], jak i nowych konstrukcji w technologii MEMS/NEMS [13,14]. Praca nad rozwojem i weryfikacją przedstawionej metody wymaga przeprowadzenia dalszych systematycznych i metodycznych badań.

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., Drobnik S.: *Metrologia turbulencji przepływów*. Wrocław, Zakład Narodowy im. Ossolińskich (1995).
- [2] Bruun H.H.: *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*. University Press, Oxford (1995).
- [3] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements*. Meas. Sci. Technol. **15**, 1835-1847 (2004).
- [4] 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).
- [5] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system under various perturbations*. Meas. Sci. Technol. **17**, 2665-2675 (2006).
- [6] Ligęza P.: *Constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. **78** (2007).
- [7] Ligęza P.: *Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant-temperature anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. **79** (2008).
- [8] Ligęza P.: *Optimization of Single-Sensor Two-State Hot-Wire Anemometer Transmission Bandwidth*. Sensors **8**, 10, 6747-6760 (2008).
- [9] Ligęza P.: *An investigation of a constant-bandwidth hot-wire anemometer*. Flow Measurement and Instrumentation, vol. **20** (2009).
- [10] Ligęza P.: *Termooanemometryczny system pomiarowy*. Zgłoszenie patentowe PL428929 (2019).
- [11] Skotniczny P., Ostrogórski P.: *Three-dimensional air velocity distributions in the vicinity of a mine heading's sidewall*. Archives of Mining Sciences **63**, 2, 335-352 (2018).
- [12] Dziurzyński W., Krach A., Pałka T.: *Shearer control algorithm and identification of control parameters*. Archives of Mining Sciences **63**, 3, 537-552 (2018).

- [13] Fan Y., Arwatz G., Buren T.W., Hoffman D.E., Hultmark M.: *Nanoscale sensing devices for turbulence measurements*. *Experiments in Fluids* **56**, 138 (2015).
- [14] Wang J.J., Hu H., Chen Ch.Z.: *The Effect of Sensor Dimensions on the Performance of Flexible Hot Film Shear Stress Sensors*. *Micromachines* **10** (5), 305 (2019).

The method for elimination of electromagnetic interference in hot-wire anemometric measurements

Abstract

The main application area for hot-wire anemometers are measurements of gas flow velocity fluctuations in a wide range frequency spectrum. An important feature of hot-wire anemometric measuring systems is therefore the highest possible frequency bandwidth of the measuring circuit. As a standard, a wide frequency response is obtained by using a constant temperature mode of the anemometer. In this mode, the temperature of the heated measuring element is kept constant, by the use of an electronic system with feedback. The frequency response for constant temperature anemometers can reach hundreds of kilohertz. Since the hot-wire sensor is a kind of induction loop in electrical terms, electromagnetic interference may be induced in it. The high gain and the wide frequency bandwidth of the constant temperature system mean that in the event of electromagnetic interference, the share of unwanted signals in the output signal of the anemometer can be significant. This work presents the concept of the method for eliminating these disturbances.

Keywords: constant temperature anemometer, velocity fluctuations, frequency response, electromagnetic interference, interference suppression