



Implementacja metod znaczników termicznych w pomiarach prędkości przepływu gazów w aerologii górniczej

Implementation of thermal markers methods in measurements of gas flow velocity in mining aerology

Prof. dr hab. inż. Paweł Ligęza^{*)}

Treść: Jednym z ważnych problemów aerologii górniczej jest pomiar bardzo małych prędkości przepływu powietrza i innych gazów. Jedną z metod jest metoda znaczników termicznych, polegająca na wywołaniu w przepływie fluktuacji temperatury i pomiarze prędkości ich propagacji. W artykule poddano analizie problem implementacji metod znaczników termicznych w pomiarach prędkości przepływu gazów w aerologii górniczej. Obszar zastosowań tych metod dotyczy pomiarów wzorcowych, specjalistycznych pomiarów wentylacyjnych, badań laboratoryjnych i modelowych, a także potencjalnego zastosowania metod w przenośnych przyrządach pomiarowych. Metody znaczników termicznych umożliwią bezwzględny pomiar bardzo małych prędkości przepływu powietrza i innych gazów, nie wymagają wzorcowania, są mało wrażliwe na zmiany temperatury, ciśnienia, składu czy wilgotności medium.

Abstract: One of the important problems of mining aerology is the measurement of very low flow velocity of air and other gases. One of the applicable methods is the method of thermal markers, which consist in analyzing the temperature fluctuations propagation in flow. In this paper we analyzed the problem of implementation thermal markers methods for measuring in mining aerology. Areas of application of these methods are standard and specialized ventilation measurements, laboratory and model tests, and the potential application in portable measuring instruments. Methods of thermal markers allow for absolute measurement of very low flow velocity range, do not require calibration and are not very sensitive to changes in temperature, pressure or humidity.

Słowa kluczowe:

aerologia górnicza, pomiar małych prędkości, metody pomiarowe, znaczniki termiczne, pomiary wzorcowe

Key words:

mining aerology, low velocity measurement, measurement methods, thermal markers, standard measurements

1. Wprowadzenie

Pomiary kopalniane stanowią przedmiot aerologii górniczej. Wentylacja i przewietrzanie kopalń różnią się zasadniczo od zagadnień wentylacyjnych dotyczących innych gałęzi przemysłu. Efektywne przewietrzanie wyrobisk podziemnych jest zasadniczym warunkiem pracy ludzi i eksploatacji złóż, a odpowiednia wentylacja stanowi o bezpieczeństwie. Niezbędne zatem są regularne pomiary parametrów chemicznych i fizycznych powietrza w wyrobisku za pomocą specjalistycznej aparatury pomiarowej, odpowiadającej wymogom stawianym przez warunki charakterystyczne dla kopalni. Pomiary prędkości przepływu powietrza stanowią jeden z najważniejszych elementów badania stanu i przebiegu procesu wentylacji kopalń. Dla zapewnienia efektywnego przewietrzania wyrobisk kopalnianych konieczne jest ciągłe pozyskiwanie informacji o wartości parametrów wentylacyjnych w wybranych punktach kopalni. Sprawność i niezawodność systemu pomiarowego sieci wentylacyjnej wpływa na przebieg procesu eksploatacji złoża i bezpieczeństwo pracy w kopalni [11].

Ze względu na specyficzne warunki metrologiczne oraz różnicowanie celu dla potrzeb górnictwa opracowano szereg metod pomiaru prędkości przepływu gazu.

Wielkość fizyczna jaką jest prędkość dowolnego obiektu definiowana jest jako pochodna wektora położenia obiektu względem czasu. W wielu zagadnieniach prędkość obiektu można wyznaczyć bezpośrednio z definicji, bowiem z dużą dokładnością możliwe jest wyznaczenie, zarówno położenia obiektu, jak i czasu. W mechanice płynów zagadnienie to ma jednak odmienny charakter, ponieważ płyn generalnie traktowany jest jako ośrodek ciągły i istnieje zasadniczy problem z wyróżnieniem elementu płynu, którego prędkość podlega pomiarowi. Z tego względu metody pomiaru prędkości przepływu płynu można podzielić na dwie podstawowe grupy – metody pośrednie i metody znacznikowe. W metodach pośrednich wykorzystywane są zjawiska fizyczne, na przebieg których wpływa prędkość przepływu. Na podstawie modelu zjawiska oraz pomiaru parametrów jego przebiegu wyznaczana jest badana prędkość. Zastosowanie znajdują tu zjawiska przekazu pędu, ciśnieniowe, ultradźwiękowe, elektromagnetyczne, wir Karmana, efekt Coriolisa oraz kalorymetria. Natomiast metody znacznikowe polegają na pomiarze prędkości znacznika istniejącego [2] lub wprowadzonego

^{*)} Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie

do ośrodka, przy czym zakłada się, że znacznik propaguje z prędkością zbliżoną do prędkości płynu. Znaczniki stanowią obiekty, których przemieszczanie się wraz z płynem może być obserwowane i może podlegać pomiarowi. Najczęściej stosowane są znaczniki mechaniczne, optyczne, jonizacyjne, chemiczne oraz termiczne.

W aerologii górniczej, a także wybranej klasie innych zagadnień naukowych i technicznych mamy do czynienia z problemem pomiaru bardzo małych prędkości przepływu powietrza i innych gazów, w zakresie prędkości do około 1 m/s. Zagadnienie to dotyczy problemu wzorcowania górniczych przyrządów pomiarowych, specjalistycznych pomiarów wentylacyjnych oraz badań laboratoryjnych i modelowych. Również w wielu zagadnieniach technologicznych wymagany jest pomiar przepływów i mikroprzepływów w zakresie bardzo małych prędkości. Ze względu na specyficzne właściwości metrologiczne problem ten stanowi odrębne zagadnienie metrologii przepływów.

Wiele klasycznych metod pomiarowych, takich jak metody mechaniczne bazujące na przekazaniu pędu czy metody ciśnieniowe w tym zakresie pomiarowym są nieprzydatne [2]. Często stosowana w tych zagadnieniach metoda termoanemometryczna nie jest metodą bezwzględną, a więc wymaga wzorcowania. Ponadto termoanemometria jest wrażliwa na parametry przepływu, takie jak temperatura, skład gazu, wilgotność czy ciśnienie [12]. Korzystnym rozwiązaniem jest stosowanie tu metod znacznikowych. Przykładowo metody LDA i PIV wykorzystują wprowadzony do przepływu posiew stanowiący znacznik optyczny [1]. Niestety wprowadzenie posiewu w wielu zastosowaniach jest problemem trudnym technicznie, a ponadto są to metody stosunkowo złożone i nie jest możliwa realizacja taniach, przenośnych przyrządów pomiarowych.

Metoda znaczników termicznych, polegająca na wywołaniu w przepływie fluktuacji temperatury i pomiarze prędkości ich propagacji jest w zakresie małych prędkości przepływu dobrym i często stosowanym rozwiązaniem. Pierwsze rozwiązania w zakresie tej metody wykorzystywały dwa elementy: nadajnik i detektor zaburzenia temperaturowego, przy czym mierzono czas przelotu znacznika pomiędzy tymi elementami. Nadajnik i detektor to rezystancyjne przetworniki temperatury zrealizowane w postaci cienkiego drutu, folii lub elementu dyskretnego, przykładowo termistora. Nadajnik ogrzewany jest impulsowo lub periodycznie za pomocą prądu i generuje zaburzenie termiczne w przepływie. Detektor pracuje w układzie termometru rezystancyjnego i jest odbiornikiem zaburzenia termicznego. Najprostsze rozwiązanie złożone z nadajnika i detektora nie pozwala na precyzyjny pomiar prędkości ze względu na inercję cieplną tych elementów

i związany z tym błąd pomiaru czasu przelotu zaburzenia. Jednym z najnowszych rozwiązań w tej dziedzinie jest metoda zaproponowana w pracach [9,10]. Wykorzystuje ona pojedynczy nadajnik periodycznej fali temperaturowej oraz dwa detektory temperatury umieszczone w bazowej odległości od siebie. Pozwala to na eliminację inercji nadajnika zaburzenia, a przy założeniu identyczności obu torów detekcji ograniczony jest wpływ inercji cieplnej detektorów. Ponadto złożona analiza spektralna sygnałów z detektorów pozwala na prowadzenie precyzyjnych pomiarów.

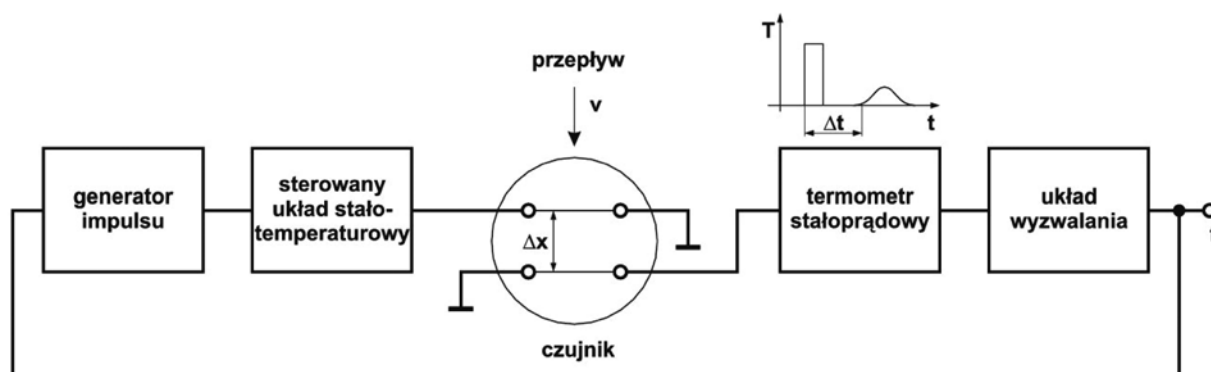
Jednym z wariantów metody znaczników termicznych jest rozwiązanie, w którym budowa czujnika jest zbliżona, odmienny natomiast jest proces pomiarowy [8]. Czujnik zbudowany jest również z trzech elementów umieszczonych kolejno na linii prądu przepływu, przy czym dwa z nich pełnią funkcję nadajników fali temperaturowej, a trzeci jest detektorem. Nadajniki umieszczone są w zadanej odległości od siebie, natomiast elektrycznie połączone są szeregowo. Zasilane są ze wspólnego układu generacji fali, natomiast w przepływie generowane są dwie fale temperaturowe przesunięte w fazie względem siebie. Te dwa sygnały docierają do pojedynczego detektora temperatury. Wykorzystano tu superpozycję dwóch fal temperaturowych. Miarą prędkości jest częstotliwość generacji fali tak dobrana, aby w wyniku superpozycji fal uzyskać minimum amplitudy sygnału na detektorze.

W pracy poddano analizie problem implementacji metod znaczników termicznych w pomiarach małych prędkości przepływu gazów w aerologii górniczej, w szczególności w kontekście pomiarów wzorcowych, a także potencjalnego zastosowania metod w przenośnych przyrządach pomiarowych zbudowanych w oparciu o standardowy mikrokontroler. Przyrządy takie, przy stosunkowo prostej konstrukcji, umożliwią dokonywanie pomiaru bardzo małych prędkości przepływu powietrza i innych gazów, przy czym nie wymagają wzorcowania, a ponadto są mało wrażliwe na zmiany temperatury, ciśnienia, składu czy wilgotności medium.

2. Metoda oscylacyjna

Jednym z najprostszych wariantów zastosowania znaczników termicznych w pomiarach przepływów jest metoda oscylacyjna [4]. Schemat blokowy realizacji tej metody przedstawiono na rys. 1.

Czujnik pomiarowy składa się z dwóch elementów czynnych – nadajnika i odbiornika sygnałów termicznych. Elementy te umieszczone są w badanym przepływie o prędkości v na linii prądu w odległości Δx . Nadajnik i odbiornik to rezystancyjne przetworniki temperatury – dwójniki, któ-



Rys. 1. Oscylacyjna metoda pomiaru prędkości przepływu
Fig. 1. Oscillating flow velocity measurement method

rych rezystancja jest funkcją temperatury. Nadajnik generuje sygnał temperaturowy w przepływie poprzez rozgrzanie go za pomocą przepływającego prądu elektrycznego, natomiast odbiornik pracuje w układzie termometru i przekształca docierający z przepływem sygnał temperaturowy na sygnał elektryczny. Oba elementy zrealizowane w postaci cienkiego drutu, folii lub elementu dyskretnego – termistora, termometru rezystancyjnego lub elementu półprzewodnikowego. Ważnym parametrem tych elementów jest możliwie mała stała czasowa.

W metodzie oscylacyjnej znacznik termiczny z nadajnika dociera unoszony przez przepływ do odbiornika w czasie zależnym od prędkości przepływu. Odbiornik podłączony jest do układu termometru stałoprądowego, którego sygnał wyjściowy steruje układem wyzwalania. Układ wyzwalania dokonuje zgodnie z przyjętym kryterium detekcji chwili dotarcia znacznika temperaturowego do detektora i poprzez generator impulsu i sterowany układ stałotemperaturowy [5] wyzwała następny znacznik termiczny w nadajniku. W ten sposób układ pomiarowy generuje oscylacje o częstotliwości f będącej funkcją prędkości przepływu v . W wyidealizowanym przypadku mierzona prędkość przepływu V opisana jest zależnością

$$V = \Delta x f. \quad (1)$$

Wzór (1) nie uwzględnia jednak inercji nadajnika i odbiornika sygnału termicznego, czasu trwania impulsu, przesunięć fazowych w układzie elektronicznym, zjawiska dyfuzji cieplnej oraz przesunięć czasowych wynikających z rozmycia impulsu i przyjętej metody detekcji impulsu w układzie wyzwalania. W efekcie model matematyczny zjawiska staje się złożony, a jego parametry trudne do identyfikacji. Dlatego metoda oscylacyjna nie spełnia warunków metody bezwzględnej i w praktyce wymaga wzorcowania. Uzyskana charakterystyka jest nieliniową zależnością mierzonej prędkości od częstotliwości oscylacji. Natomiast do zalet metody oscylacyjnej można zaliczyć prostą realizację układową i stosunkowo szeroki zakres mierzonych prędkości.

3. Metoda fali temperaturowej

Dla umożliwienia bezwzględnego pomiaru prędkości przepływu w oparciu o badanie propagacji znaczników termicznych w przepływie opracowano metodę fali temperaturowej [9,10]. W metodzie tej w przepływie generowany jest periodyczny sygnał temperaturowy docierający do dwóch identycznych odbiorników. Schemat blokowy realizacji tej metody przedstawiono na rys. 2.

Czujnik pomiarowy składa się z trzech elementów czynnych – nadajnika i dwóch identycznych odbiorników sygnałów termicznych umieszczonych w badanym przepływie o prędkości v na linii prądu w odległości Δx . Rozwiązanie to ma na celu eliminację wpływu inercji elementów czynnych czujnika na pomiar. W metodzie tej nadajnik generuje w przepływie ciągły periodyczny sygnał temperaturowy o częstotliwości f_0 . Uzyskuje się to dzięki sterowaniu układu stałotemperaturowego nadajnika z generatora. W podstawowej wersji metody stosuje się sygnał sinusoidalny o stałej częstotliwości, jednak możliwe są inne warianty. Fala temperaturowa unoszona jest z przepływem i dociera do pierwszego i drugiego odbiornika. Odbiorniki pracują w układach stałoprądowych, a ich sygnały wyjściowe przesyłane są do układu pomiaru przesunięcia fazowego. Sygnałem wyjściowym jest przesunięcie fazowe φ sygnałów na odbiornikach, stanowiące funkcję mierzonej prędkości przepływu. Przesunięcie fazowe sygnału sinusoidalnego o częstotliwości docierającego do odbiorników opisuje zależność

$$\varphi = \frac{2\pi f_0 \Delta x}{V_T}, \quad (2)$$

gdzie: V_T - jest prędkością propagacji fali temperaturowej w przepływie. Ze względu na zjawisko dyfuzji cieplnej prędkość V_T nie jest tożsama z mierzoną prędkością przepływu V . W pracy [5] wyprowadzono związek tych prędkości w postaci

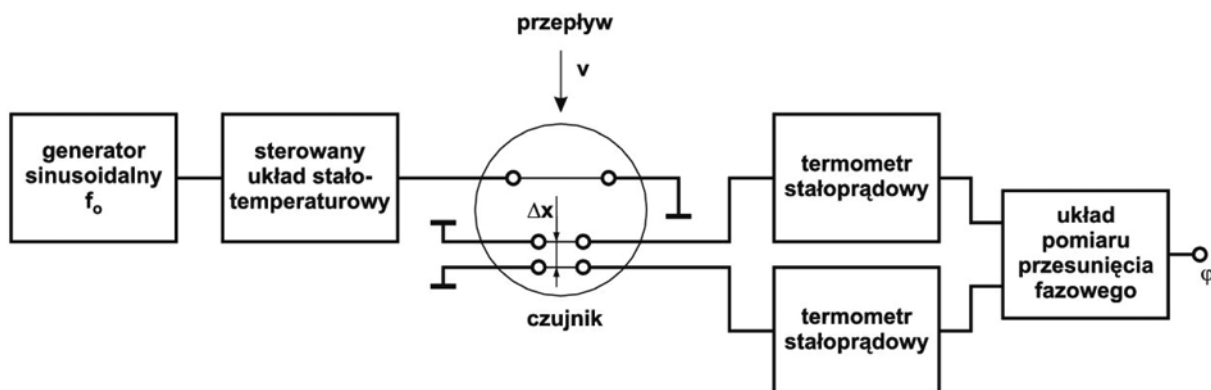
$$V = V_T \sqrt{1 - \left(\frac{4\pi\kappa f_0}{V_T^2} \right)^2}, \quad (3)$$

gdzie: κ - jest współczynnikiem dyfuzji cieplnej ośrodka. Zgodnie z (3) znając prędkość V_T propagacji fali temperaturowej w przepływie oraz współczynnik dyfuzji cieplnej κ można wyznaczyć mierzona prędkość przepływu V . Z analizy równania (3) wynika, że w początkowym zakresie prędkość propagacji fali temperaturowej jest większa od prędkości przepływu, natomiast od pewnej prędkości można przyjąć, że obie prędkości są praktycznie równe. Z równań (2) i (3) możemy wyznaczyć mierzona prędkość przepływu w funkcji przesunięcia fazowego

$$V = \frac{2\pi f_0 \Delta x}{\varphi} \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa \varphi^2}{\pi f_0 \Delta x^2} \right)^2}, \quad (4)$$

a pomijając dyfuzję cieplną otrzymujemy związek

$$V = \frac{2\pi f_0 \Delta x}{\varphi}. \quad (5)$$



Rys. 2. Metoda pomiaru prędkości przepływu z wykorzystaniem fali temperaturowej
Fig. 2. The method of measuring flow velocity using temperature wave

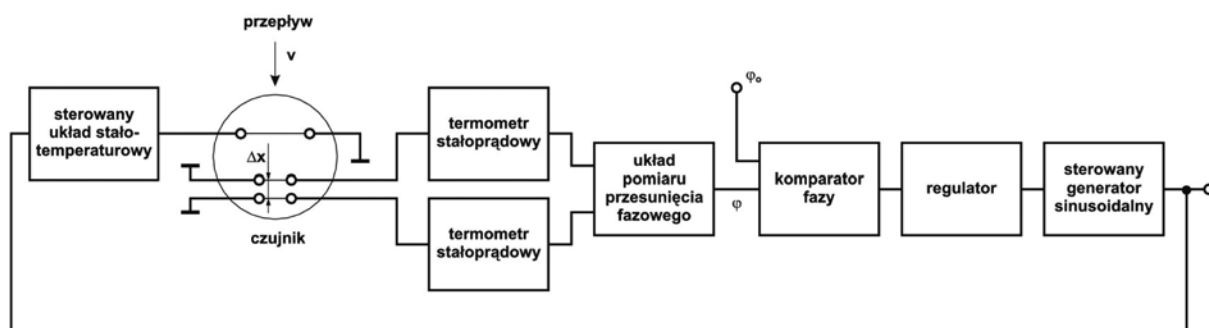
Tak więc w metodzie fali temperaturowej, znając częstotliwość f_p , odległość odbiorników Δx oraz współczynnik dyfuzji cieplnej κ , poprzez pomiar przesunięcia fazowego φ możemy wyznaczyć zgodnie z (4) mierzoną prędkość przepływu w sposób bezwzględny. Pomiar przesunięcia fazowego może być zrealizowany na drodze analogowej, lub po przetworzeniu sygnałów z odbiorników na cyfrowe możliwe jest zastosowanie analizy Fouriera. Wartość współczynnika dyfuzji cieplnej ośrodka może być wyznaczona w tej metodzie analitycznie poprzez zastosowanie kilku wartości częstotliwości sygnału i rozwiązanie odpowiedniego układu równań. Zaniedbując zjawisko dyfuzji prędkość przepływu wyznaczamy z zależności (5). Prędkość ta jest liniową funkcją odwrotności przesunięcia fazowego. Metoda ta znajduje zastosowanie w szczególności jako bezwzględna metoda wzorcowa w zakresie małych prędkości przepływu. Zakres pomiarowy dla większych prędkości jest ograniczony ze względu na malejącą amplitudę i rozmycie sygnałów na odbiornikach oraz rosnący błąd wyznaczania niewielkich przesunięć fazowych. W metodzie tej ze względu na dyspersyjny charakter propagacji znacznika termicznego stosowany jest głównie sygnał sinusoidalny, jednak możliwe jest stosowanie periodycznych sygnałów złożonych czy sygnałów MBS [3].

4. Metoda stałofazowa

Ciekawym wariantem metody fali temperaturowej jest metoda stałofazowa. Schemat blokowy realizacji tej metody przedstawiono na rys. 3.

W metodzie tej czujnik i układ pomiarowy jest zbliżony do metody fali temperaturowej, natomiast częstotliwość generowanej fali nie jest stała. Układ pracuje w pętli sprzężenia zwrotnego, zmieniając częstotliwość generowanej fali w taki sposób, aby niezależnie od prędkości przepływu utrzymać stałe, zadane przesunięcie fazowe sygnałów na odbiornikach. W układzie sygnały z termometrów stałoprądowych odbiorników podawane są do układu pomiaru fazy. Zmierzona faza porównywana jest z wartością zadaną φ_0 w komparatorze fazy, a sygnał błędny poprzez regulator steruje pracą generatora sinusoidalnego kontrolującego przez układ stałotemperaturowy pracę nadajnika. W stanie ustalonym przesunięcie fazowe sygnałów z odbiorników utrzymywane jest na zadanej wartości φ_0 , a częstotliwość generacji fali jest miarą prędkości przepływu zgodnie z zależnością analogiczną do (4)

$$V = \frac{2\pi f \Delta x}{\varphi_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa \varphi_0^2}{\pi f \Delta x^2} \right)^2}. \quad (6)$$



Rys. 3. Stałofazowa metoda pomiaru prędkości przepływu
Fig. 3. Constant-phase flow velocity measurement method

Zaniedbując dyfuzję cieplną otrzymujemy związek

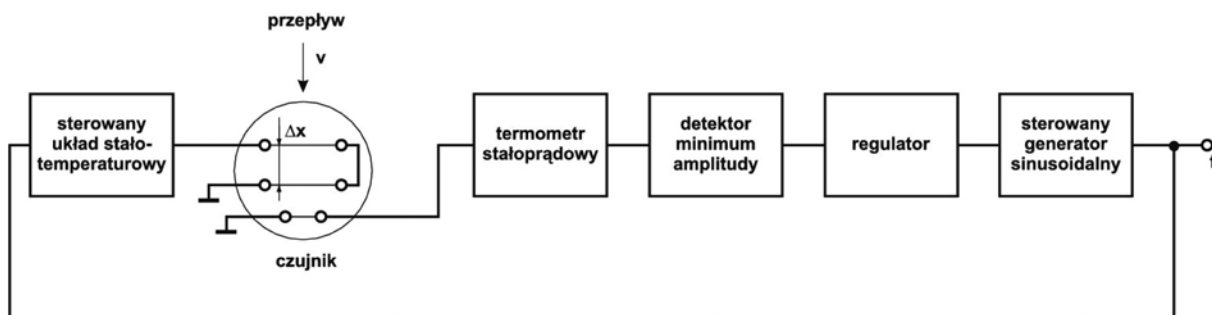
$$V = \frac{2\pi f \Delta x}{\varphi_0}. \quad (7)$$

Metoda ta ma właściwości zbliżone do metody fali temperaturowej, jednak uzyskujemy tu bezpośrednią liniową zależność częstotliwości fali od mierzonej prędkości. Faza utrzymywana jest na stałej, zadanej wartości, co pozwala na rozszerzenie zakresu pomiarowego. Jednak układ pomiarowy w stosunku do metody fali temperaturowej jest tu bardziej rozbudowany, a dodatkowym problemem jest możliwość utraty synchronizacji w stanach nieustalonych.

5. Metoda superpozycji fal temperaturowych

Metody fal temperaturowych i stałofazowa wykorzystują pojedynczy nadajnik fali temperaturowej oraz dwa detektory temperatury rozmieszczone w zadanej odległości. Metoda superpozycji to nowe rozwiązanie [8], w którym budowa czujnika jest zbliżona, odmienny natomiast jest proces pomiarowy. Schemat blokowy realizacji tej metody przedstawiono na rys. 4.

Czujnik zbudowany jest również z trzech elementów umieszczonych kolejno na linii prądu przepływu, przy czym dwa z nich pełnią funkcję nadajników fali temperaturowej, a trzeci jest odbiornikiem. Nadajniki umieszczone są w zadanej odległości Δx od siebie, natomiast elektrycznie połączone są szeregowo. Zasilane są ze wspólnego układu generacji fali, natomiast w przepływie generowane są dwie fale temperaturowe przesunięte w fazie względem siebie. Te dwa sygnały docierają do pojedynczego odbiornika sygnału temperaturowego. Wykorzystano tu superpozycję dwóch fal temperaturowych. Istnieje bowiem taka minimalna wartość częstotliwości f , dla której fale docierają do odbiornika w przeciwnej fazie i wzajemnie się znoszą, a więc składowa zmienna sygnału na odbiorniku osiąga minimum. Przesunięcie fazy sygnałów wynosi wtedy π . Układ pracuje w pętli sprzężenia zwrotnego, zmieniając częstotliwość generowanej fali w taki sposób, aby niezależnie od prędkości przepływu utrzymywać minimalną wartość amplitudy składowej zmiennej sygnału na odbiorniku. W układzie sygnał z termometru stałoprądowego odbiornika podawany jest do detektora minimum amplitudy. Sygnał błędny detektora poprzez regulator steruje pracą generatora sinusoidalnego kontrolującego przez układ stałotemperaturowy pracę nadajników. W stanie ustalonym sygnały docierające z nadajników do odbiornika utrzymywane są w przeciwnej fazie, a częstotliwość generacji fali jest miarą prędkości przepływu zgodnie z zależnością



Rys. 4. Metoda superpozycji fal temperaturowych

Fig. 4. The method of temperature waves superposition

$$V = 2f\Delta x \sqrt{1 - \left(\frac{\pi K}{f\Delta x^2} \right)^2}. \quad (8)$$

Zaniedbując dyfuzję ciepłą otrzymujemy związek

$$V = 2f\Delta x. \quad (9)$$

Opisana metoda ma właściwości zbliżone do metody fali temperaturowej, natomiast proces pomiarowy realizowany jest odmiennie. W metodzie superpozycji zastosowano uproszczoną detekcję amplitudową w miejsce złożonej analizy harmonicznej. Czujnik pomiarowy zasilany jest tylko czterema przewodami. W metodzie tej stałe czasowe elementów czynnych czujnika nie są tak krytyczne, jak w metodzie pojedynczej fali. Możliwa jest więc konstrukcja czujnika o zwiększonej trwałości. Metoda superpozycji fal temperaturowych stanowi metodę uzupełniającą, alternatywną dla metody pojedynczej fali, w szczególności w przenośnych przyrządach pomiarowych zbudowanych w oparciu o pojedynczy mikrokontroler, w przepływomierzach i mikroprzepływomierzach, a także w czujnikach i układach pomiarowych zbudowanych w technologii MEMS [6].

6. Podsumowanie – analiza komparacyjna i aplikacyjna metod znaczników termicznych

Aktualnie w Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górotworu PAN trwają prace nad optymalizacją parametrów metrologicznych metod znaczników termicznych oraz ich zastosowaniem w systemach pomiarowych. Na rys. 5. pokazano prototypową sondę do pomiaru prędkości przepływu gazów za pomocą znaczników termicznych.

Główne elementy sondy to nadajnik i dwa odbiorniki sygnału termicznego wykonane z drutu wolframowego o średnicy kilku mikrometrów. Elementy te rozpięte są na widocznych stalowych wspornikach igłowych. Sonda współpracuje z elektronicznym układem generacji i detekcji sygnału termicznego, który sterowany jest z komputera. Algorytm pomiarowy realizowany jest programowo. Umożliwia to realizację złożonych algorytmów pomiarowych oraz ich optymalizację. Przeznaczeniem tego systemu są pomiary wzorcowe.

Przedstawione metody pomiaru małych prędkości przepływu z wykorzystaniem znaczników termicznych mogą być zastosowane w metrologii przepływów w zakresie aerologii górniczej, a także w innych dziedzinach, takich jak badania nawiewów laminarnych w salach operacyjnych, badania



Rys. 5. Prototypowa sonda pomiarowa dla metody znaczników termicznych

Fig. 5. Prototype sensor for the method of thermal markers

Tablica 1. Zestawienie porównawcze parametrów i obszaru aplikacyjnego metod
Table 1. Comparison of the parameters and application area of the analyzed methods

	metoda oscylacyjna	metoda fali termicznej	metoda stalofazowa	metoda superpozycji
parametry metody				
zakres pomiarowy	szeroki	ograniczony	szeroki	ograniczony
liniowość	ograniczona	dobra	dobra	dobra
dokładność	ograniczona	wysoka	wysoka	wysoka
metoda bezwzględna	nie	tak	tak	tak
wpływ stanu medium	znaczący	znikomy	znikomy	znikomy
konstrukcja czujnika	prosta	złożona	złożona	uproszczona
aplikacja metody				
pomiary wzorcowe	zła	doskonała	doskonała	dobra
przyrządy przenośne	dobra	ograniczona	ograniczona	dobra
przyrządy laboratoryjne	ograniczona	dobra	dobra	dobra
przepływomierze	dobra	ograniczona	dobra	doskonała

mikrobiologicznych komór laminarnych, pomiary wentylacji pomieszczeń o kontrolowanej czystości w przemyśle elektronicznym, farmaceutycznym, chemicznym i spożywcym, pomiary wentylacji ładowni, magazynów i chłodni.

Metody znaczników termicznych pozwalają na dokonywanie pomiaru bardzo małych prędkości przepływu powietrza i innych gazów, przy czym metody te mają charakter bezwzględny (absolutny), a więc nie wymagają wzorcowania. Prędkość przepływu wyznaczana jest na podstawie modelu i wartości parametrów opisujących zastosowane zjawisko fizyczne bezpośrednio z definicji prędkości. Ze względu na małe rozmiary czujnika pomiar ma charakter quasi – punktowy, a inwazyjność pomiaru jest znikoma. Ponadto pomiar jest mało wrażliwy na zmiany temperatury, ciśnienia, składu czy wilgotności medium. Wynik pomiaru bez korekcji związanej z dyfuzją cieplną jest obciążony błędem w początkowym zakresie prędkości. Możliwa jest korekcja tego błędu, wymaga to jednak uwzględnienia współczynnika dyfuzyjności cieplnej badanego medium. W tabeli 1 przedstawiono syntetyczne zestawienie porównawcze parametrów i obszaru aplikacyjnego omówionych metod znaczników termicznych.

Zestawienie to oraz przedstawiona analiza metod znaczników termicznych może stanowić źródło informacji dla służb prowadzących pomiary w zakresie aerologii górniczej i metrologii przepływów, pracowników naukowych zajmujących się badaniami laboratoryjnymi, wzorcowaniem i pomiarami *in situ*, oraz dla projektantów i konstruktorów systemów pomiarowych. Istotnym problemem jest bowiem dobór właściwego i zoptymalizowanego narzędzia badawczego w prowadzonych pomiarach. Opisane zagadnienia mogą również być wykorzystane w procesie dydaktycznym w zakresie metrologii wielkości nieelektrycznych. W pracy nie sposób było zawrzeć wszystkich zagadnień związanych z zastosowaniem znaczników termicznych w pomiarach przepływów w zakresie małych prędkości. Starano się w sposób możliwie systematyczny przedstawić zagadnienia podstawowe. Natomiast analiza problemów szczegółowych możliwa jest w oparciu o zamieszczoną literaturę.

7. Podziękowania

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer

DEC-2012/07/B/ST8/03041: „Badania przestrzennej propagacji oraz optymalizacja metod generacji, detekcji i analizy fal temperaturowych w aspekcie bezwzględnego pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności cieplnej gazów”

Literatura

1. Cao X., Liu J., Jiang N., Chen Q.: Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications; *Energy and Buildings*, 69, (2014), s. 367–380.
2. Choon T. W., Prakash C., Aik L. E., Hin T. T.: Development of Low Wind Speed Anemometer, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology* 2, 3, (2012), s. 39-42.
3. Kęsek D., Rachalski A.: Wykorzystanie sygnału typu MBS do pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności temperaturowej powietrza w anemometrze z falą cieplną; „Przeгляд Elektrotechniczny” 2014, Nr 8, s. 172-174.
4. Kielbasa J.: Fale cieplne w metrologii przepływów; „Zeszyty Naukowe AGH”, Kraków 1976.
5. Ligeza P.: A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications; *Review of Scientific Instruments*, 71, 1, (2000), s. 109-112.
6. Liu H-B., Lin N., Pan S-S., Miao J., Norford, L. K.: High Sensitivity, Miniature, Full 2-D Anemometer Based on MEMS Hot-Film Sensors; *Sensors Journal, IEEE*, 13, 5, (2013), s. 1914 – 1920.
7. Ligeza P.: Use of Natural Fluctuations of Flow Parameters for Measurement of Velocity Vector; *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63, 3 (2014), s. 633 - 640.
8. Ligeza P., Kęsek D.: Employment of temperature waves superposition in method of absolute measurement of gas flow velocities down to the sub 1 m/s range; *Sensors and Actuators A: Physical* 228, (2015), s. 50-54.
9. Rachalski A.: High-precision anemometer with thermal wave; *Rev. of. Sci. Instr.* 77, 9, 2006.
10. Rachalski A.: Absolute measurement of low gas flow by means of the spectral analysis of the thermal wave; *Rev. of. Sci. Instr.* 84, 2, 2013.
11. Roszczyński W., Trutwin W., Waclawik J.: Kopalniane pomiary wentylacyjne; Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1992.
12. Sattarzadeh S. S., Kalpakli A., Örlü R.: Hot-Wire Calibration at Low Velocities: Revisiting the Vortex Shedding Method; *Advances in Mechanical Engineering* 2013, s. 1-6.