

Zastosowanie termooanemometrycznej metody pomiaru prędkości przepływu powietrza w górnictwie głębinowym

Część 1 – Czujniki pomiarowe

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY^{ID}, ELŻBIETA POLESZCZYK^{ID}, PAWEŁ LIGĘZA^{ID}

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

Streszczenie

Analiza i pomiary sieci wentylacyjnej stanowią ważny element badania stanu i przebiegu procesu wentylacji kopalń. Sprawność i niezawodność systemu sieci wentylacyjnej wpływa na przebieg procesu eksploatacji i bezpieczeństwo pracy w kopalni. W artykule przedstawiono koncepcję i prototyp termooanemometrycznego systemu pomiarowego do wielopunktowych pomiarów pola prędkości. System oparty jest na czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Matryca takich czujników rozmieszczonych w badanym przekroju wyrobiska współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych. Umożliwia to symultaniczny, wielopunktowy pomiar prędkości przepływu w badanym przekroju. W czujnikach zastosowano oryginalny układ pomiarowy oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury. Układ ten jest przedmiotem patentu autorów. Opracowany system pomiarowy posłużył do weryfikacji komputerowych symulacji przepływów powietrza w wybranych rejonach wyrobisk górniczych. W tej części cyklu publikacji przedstawiono koncepcję konstrukcji czujników pomiarowych.

Słowa kluczowe: Wentylacja kopalń; pomiary sieci wentylacyjnych; systemy pomiarowe; termooanemometria; kompensacja temperaturowa; symulacja komputerowa

1. Wprowadzenie

Analiza i pomiary sieci wentylacyjnej stanowią ważny element badania stanu i przebiegu procesu wentylacji kopalń. Sprawność i niezawodność systemu sieci wentylacyjnej wpływa na przebieg procesu eksploatacji i bezpieczeństwo pracy w kopalni [1].

Do prowadzenia badań stanów nieustalonych w sieciach wentylacyjnych i innych pomiarów dynamicznych stosowane są termooanemometry, które posiadają szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości, sięgające setek kiloherców. Autorzy projektu proponują eksperymentalną weryfikację numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku górniczym z zastosowaniem termooanemometrycznego systemu wielopunktowego pomiaru pola prędkości, przystosowanego do specyficznych warunków pracy w kopalni, takich jak przepływ nieustalony i nieizotermiczny o znacznym zanieczyszczeniu i wilgotności. Prototypowe czujniki pomiarowe i koncepcja tego systemu została opracowana i przebadana eksperymentalnie w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN.

Termooanemometryczny system pomiarowy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości jest oparty na czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Matryca takich czujników rozmieszczonych w badanym przekroju wyrobiska współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych. Umożliwia to symultaniczny, wielopunktowy pomiar prędkości przepływu w badanym przekroju. W czujnikach zastosowano oryginalny układ pomiarowy oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury. Układ ten jest przedmiotem patentu autorów. Nowe rozwiązanie technologiczne polega również na zastosowaniu do pomiaru przepływów wolnozmiennych miniaturowych cienkowarstwowych sensorów platynowo-ceramicznych, jako czujnika anemometrycznego i kompensującego. Czujniki takie posiadają bardzo dobrą stabilność czasową i temperaturową oraz dużą

odporność mechaniczną, co jest szczególnie istotne w zastosowaniu do układu termooanemometrycznego przeznaczonego do pomiarów w warunkach wyrobiska górniczego. Do pomiaru szybkozmiennych fluktuacji prędkości opracowano czujniki, w których elementem pomiarowym jest drut wolframowy o średnicy kilku mikrometrów. Oba typy czujników mogą pracować również w układzie podwójnym z detekcją zawrotu wektora prędkości.

2. Termooanemometryczna metoda pomiaru prędkości przepływu powietrza w górnictwie

Pomiary kopalniane stanowią przedmiot aerologii górniczej. Wentylacja i przewietrzanie kopalń różni 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 przy pomocy specjalistycznej aparatury pomiarowej, odpowiadającej wymogom stawianym przez warunki charakterystyczne dla kopalni [1].

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

Obszarem zainteresowań Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górotworu PAN od 40-tu lat są metody pomiaru prędkości przepływu gazów ze szczególnym uwzględnieniem metod przydatnych w górnictwie.

Typowym przyrządem stosowanym w górniczych pomiarach wentylacyjnych jest anemometr skrzydełkowy. Ze względu na znaczną stałą czasową nadaje się on przede wszystkim do prowadzenia pomiarów statycznych. Pomiary dynamiczne anemometrem skrzydełkowym są z reguły obarczone znacznym błędem [2]. Do prowadzenia pomiarów przepływów zmiennych w czasie, badania stanów nieustalonych w sieciach wentylacyjnych i innych pomiarów dynamicznych stosowane są termooanemometry, które posiadają szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości, sięgające setek kiloherców. Do pomiarów w przepływach nieizotermicznych, z jakimi mamy do czynienia w warunkach kopalnianych, termooanemometry wymagają zastosowania kompensacji temperaturowej.

Dotychczas problem pomiaru prędkości przepływu medium o wysokim stopniu zapylenia oraz dużej wilgotności, które to warunki wpływają w zasadniczy sposób na niezawodność termooanemometrycznej aparatury pomiarowej, nie był szczegółowo badany w aspekcie warunków charakterystycznych dla wyrobiska węglowego.

Termooanemometria jest pośrednią metodą pomiaru prędkości poprzez pomiar strat cieplnych grzanego elementu umieszczonego w badanym przepływie. Wyróżnikiem metody termooanemometrycznej jest szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości, mały obszar pomiarowy i znikomy stopień inwazyjności metody, ze względu na miniaturowe rozmiary czujnika.

W pracach objętych projektem badawczym wykorzystano termooanemometryczny system wielopunktowych i symultanicznych pomiarów prędkości przepływu powietrza oparty na zintegrowanych głowicach pomiarowych oraz jego rozwinięcie, czyli hybrydowy termooanemometryczny system wyznaczania wektora prędkości, który został skonstruowany i szczegółowo przebadany przez autorów opracowania

3. Termooanemometryczny system wielopunktowych i symultanicznych pomiarów pól prędkości przepływu

Koncepcja systemu pomiarowego opiera się na następujących założeniach:

- sondy umożliwiające pomiar zbliżony do punktowego,
- niewielka inwazyjność sond pomiarowych,
- możliwość dokonywania pomiarów dynamicznych,
- przystosowanie sond do pracy w warunkach przemysłowych,
- zastosowanie platynowo-ceramicznych cienkowarstwowych czujników pomiarowych,
- stałotemperaturowy tryb pracy czujników pomiarowych,

- indywidualna kompensacja temperaturowa każdej sondy pomiarowej,
- integracja sondy z elektronicznym układem przetwarzania sygnału pomiarowego,
- wspólny system akwizycji sygnałów pomiarowych i zasilania sond.

W skład systemu wchodzi sondy termoanemometryczne zintegrowane z układem przetwarzania sygnału oraz układ akwizycji danych pomiarowych z poszczególnych sond. Rozmieszczenie sond pomiarowych w wybranych punktach badanego przepływu, a następnie rejestracja i przetwarzanie sygnałów z poszczególnych sond umożliwia symultaniczny pomiar pola temperatury i prędkości oraz wyznaczenie strumienia objętościowego przepływu płynu. Poza pomiarem temperatury i prędkości opracowano również warianty sondy do detekcji zwrotu przepływu oraz do pomiarów przepływów szybkozmiennych.

Konstrukcja sondy powstała w oparciu o termoanemometryczny układ pomiarowy, w którym w głowicy pomiarowej czujnik przyłączony jest bezpośrednio do mostka stałotemperaturowego i układu przetwarzania sygnału. Układ elektroniczny realizowany jest w technologii SMT, co pozwala na uzyskanie niewielkich rozmiarów głowicy, przy dobrych parametrach elektrycznych i termicznych. Na wspólnej płycie drukowanej z układem elektronicznym montowane są czujniki termoanemometryczne. Dodatkowo w głowicy z kompensacją temperaturową [9,10] umieszczony jest czujnik pomiaru temperatury. Sygnałem wyjściowym z głowicy jest napięcie zależne od mierzonej prędkości przepływu płynu. Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie dobrych parametrów metrologicznych układu przy zwiększonej odporności na zakłócenia i niewielkim koszcie głowicy pomiarowej. Umożliwia to wygodne prowadzenie pomiarów wielopunktowych przy zastosowaniu wielu głowic.

W zależności od rodzaju elementów pomiarowych, obsadzenia i wartości poszczególnych elementów elektronicznych realizowane są różne warianty sondy. Możliwa jest realizacja układu stałoprądowego do pomiarów termometrycznych oraz układu stałotemperaturowego do pomiarów termoanemometrycznych [3]. Termoanemometr stałotemperaturowy pracuje w zmodyfikowanym układzie mostkowym z kompensacją temperatury. Po zastąpieniu elementów kompensacji temperaturowej rezystorami układ nie jest skompensowany. Jako elementy pomiarowe mogą zostać zastosowane czujniki platynowo-ceramiczne lub czujniki drutowe do pomiaru przepływów szybkozmiennych. Sonda symetryczna złożona z dwóch identycznych termoanemometrów umożliwia detekcję zwrotu wektora prędkości.

Elementy na płycie drukowanej umieszczone są jednostronnie, co umożliwia złożenie dwóch płytek w przypadku sondy symetrycznej. Sonda pomiarowa umieszczona jest w obudowie złożonej z rurki mosiężnej zakończonej z jednej strony złączem kontaktowym, a z drugiej strony dwuelementową osłoną z tworzywa sztucznego z otworami dla czujników pomiarowych. Pierwszy element osłania czujnik pomiaru i kompensacji temperaturowej, a drugi element osłania czujnik termoanemometryczny. Drugi element osłony może być obracany względem czujnika termoanemometrycznego dla ustalenia właściwego kierunku napływu powietrza na czujnik. Sposób ukształtowania kanału przepływowego wykonanego w osłonie został dobrany na podstawie badań kierunkowych charakterystyk sondy tak, aby uzyskana charakterystyka osłoniętego elementu była optymalna. Istnieje też możliwość zdjęcia osłony w celu minimalizacji zaburzenia strugi przez osłonę czujnika w trakcie pomiarów wymagających szczególnej precyzji [16-19].

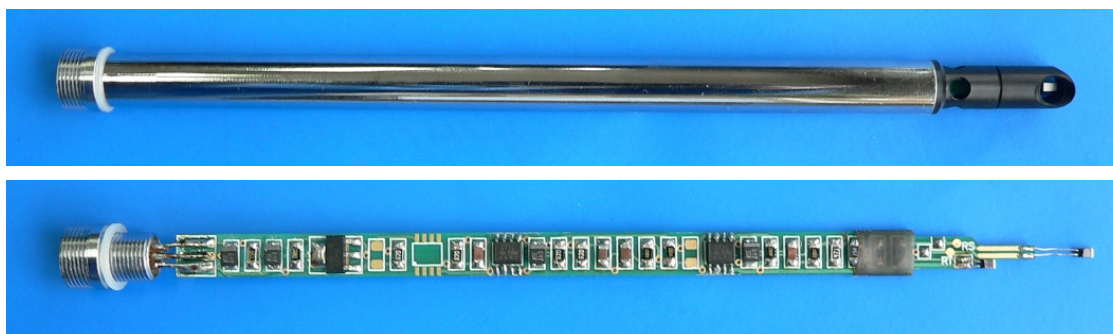
Rys. 1 przedstawia rysunek złożeniowy sondy w obudowie. Widoczne jest złącze kontaktowe sondy **1**, rurka mosiężna osłaniająca układ elektroniczny sondy **2**, osłona czujnika kompensacji temperaturowej **3**, osłona czujnika termoanemometrycznego **4**, czujnik kompensacji temperaturowej **5** oraz czujnik termoanemometryczny **6**.



Rys. 1. Rysunek złożeniowy zintegrowanej sondy termoanemometrycznej w obudowie

Opracowano następujące typy sond pomiarowych zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału pomiarowego:

- **INT 05 TP** – sonda pomiaru temperatury, czujnik platynowo-ceramiczny, zakres pomiarowy -20 do 100°C , pasmo przenoszenia 0.05 Hz ,



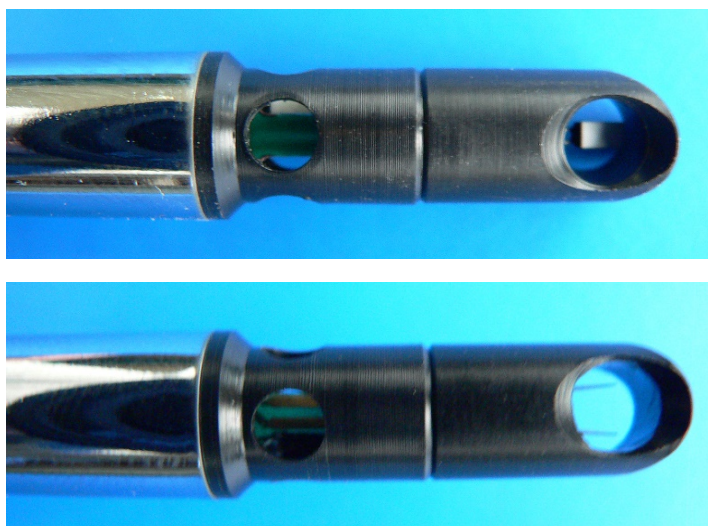
Fot. 1. Sonda (głowica) zintegrowana

- **INT 05 TW** – sonda pomiaru temperatury, czujnik wolframowy drutowy 5 μm , zakres pomiarowy -20 do 100°C , pasmo przenoszenia 100 Hz,
- **INT 05 AP** – sonda pomiaru prędkości z kompensacją temperatury, czujnik platynowo-ceramiczny, zakres pomiarowy 0 do 50 m/s, pasmo przenoszenia 20 Hz,
- **INT 05 AW** – sonda pomiaru prędkości z kompensacją temperatury, czujnik wolframowy drutowy 5 μm , zakres pomiarowy 0 do 50 m/s, pasmo przenoszenia 20 kHz,
- **INT 05 DAP** – dwukierunkowa sonda pomiaru prędkości z kompensacją temperatury, czujnik platynowo-ceramiczny, zakres pomiarowy 0 do 50 m/s, pasmo przenoszenia 20 Hz,
- **INT 05 DAW** – dwukierunkowa sonda pomiaru prędkości z kompensacją temperatury, czujnik wolframowy drutowy 5 μm , zakres pomiarowy 0 do 50 m/s, pasmo przenoszenia 20 kHz.

W skład systemu pomiarowego wchodzi sonda termooanemometryczna zintegrowana z układem przetwarzania sygnału oraz układ akwizycji danych pomiarowych z poszczególnych sond. Układ akwizycji danych pracuje w oparciu o wielofunkcyjny moduł DAQ na USB typ: NI USB-6009 firmy National Instruments o następujących parametrach:

- ilość kanałów pomiarowych – 8,
- rozdzielczość przetwarzania A/C – 14 bitów,
- częstotliwość próbkowania – 48 kS/s.

Istnieje możliwość zastosowania dwóch modułów w celu zwiększenia ilości kanałów pomiarowych. Moduły współpracują z notebookiem Toshiba Satellite L10 – 118. System pomiarowy posiada autonomiczne zasilanie i jest w pełni mobilny. Rozmieszczenie sond pomiarowych w wybranych punktach badanego pola prędkości, a następnie rejestracja i przetwarzanie sygnałów z poszczególnych sond umożliwia symultaniczny pomiar pola temperatury i prędkości oraz intensywności turbulencji, a także wyznaczenie strumienia objętościowego. Fot. 2. przedstawia czujniki głowic w dwóch wariantach.



Fot. 2. Czujniki głowic termooanemometrycznych

4. Hybrydowy termoanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu

Pomiar wektora prędkości w przestrzeni 3D wymaga określenia trzech składowych wektora prędkości. W praktyce pomiarowej bardzo często mamy do czynienia z sytuacją, kiedy kierunek wektora prędkości jest znany i stały np. w tunelach pomiarowych czy kanałach wentylacyjnych i wówczas pomiar sprowadza się do określenia wartości prędkości. Istnieje jednak wiele zagadnień metrologicznych, gdzie nie można z góry określić kierunku wektora prędkości lub zmienia się on w czasie np. w badaniach rozprywu powietrza w komorach czy przy opływie elementów przestrzennych itp. Zachodzi wówczas konieczność równoczesnego pomiaru wszystkich składowych wektora prędkości.

Sonda pomiarowa i oparty na niej system został opracowany dla przeprowadzenia eksperymentalnej weryfikacji numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku górniczym. System jest przystosowany do specyficznych warunków pracy w kopalni, gdzie przepływ jest nieustalony i nieizotermiczny, o znacznym stopniu zanieczyszczenia i wilgotności [1]. Termoanemometryczny system pomiarowy do wyznaczania składowych wektora prędkości jest oparty na trójelementowych czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Głowica zintegrowana składająca się z trójelementowej sondy i trójukładowego systemu przetwarzania danych, współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych.

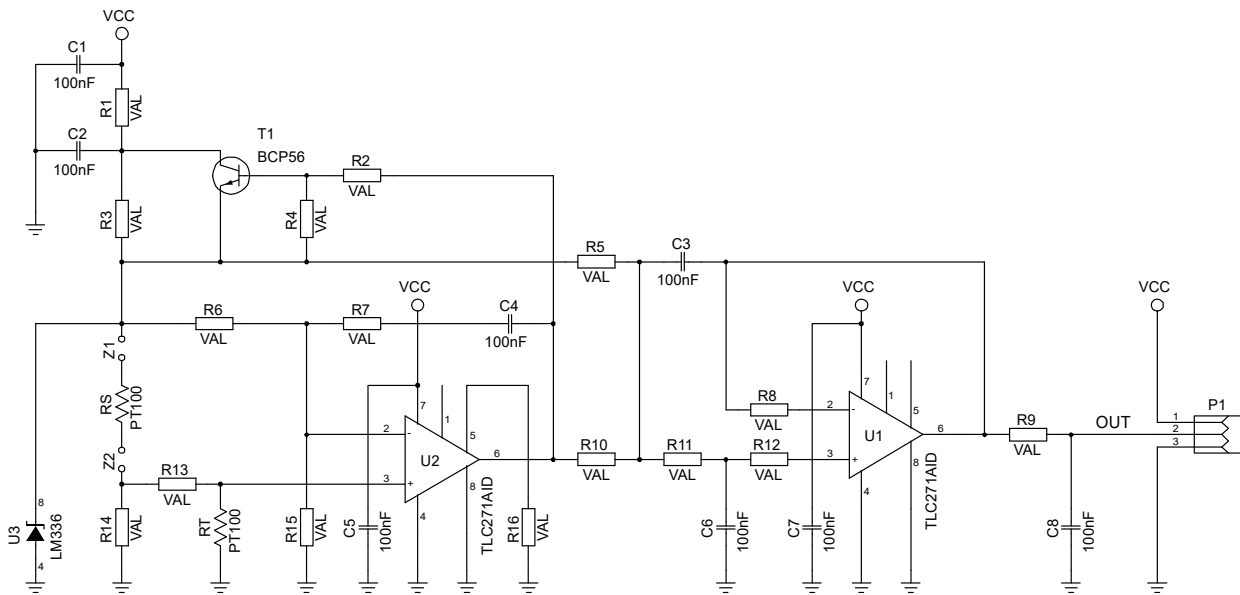
W systemie zastosowano oryginalny układ pomiarowy oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury. Nowe rozwiązanie technologiczne polega również na zastosowaniu do pomiaru przepływów wolnozmiennych miniaturowych cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych, jako czujnika anemometrycznego i kompensującego. Czujniki takie posiadają bardzo dobrą stabilność czasową i temperaturową oraz dużą odporność mechaniczną, co jest szczególnie istotne w zastosowaniu do układu termoanemometrycznego przeznaczonego do pomiarów w warunkach kopalnianych. Właściwości metrologiczne elementów pomiarowych, czyli miniaturowych, cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych zastosowanych w głowicach zostały zbadane laboratoryjnie [4]. Opisane sondy i system pomiarowy mogą znaleźć zastosowanie także w innych zagadnieniach badawczych metrologii przepływów, tam gdzie mamy do czynienia z pomiarami trójwymiarowych pól prędkości i temperatury.

Hybrydowy termoanemometryczny system wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu powstał jako rozwinięcie systemu wielopunktowych i symultanicznych pomiarów prędkości i temperatury opartego na zintegrowanych głowicach pomiarowych. System ten wyposażony w różne typy głowic pomiarowych, pozwala na wielopunktowe pomiary pola prędkości i temperatury oraz określenie kierunku i zwrotu przepływu. Zintegrowane głowice termoanemometryczne, w którym elementem mierzącym jest cienkowarstwowy sensor platynowo-ceramiczny lub włókno metaliczne zostały przystosowane do trudnych warunków pracy w wyrobisku górniczym.

Kolejnym krokiem, znacznie poszerzającym obszar aplikacyjny systemu jest budowa potrójnych głowic zintegrowanych. Zasadniczy element toru pomiarowego stanowi czujnik, którego bazę pomiarową tworzy układ trzech wzajemnie prostopadłych miniaturowych, cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych. Czujnik ten umożliwia pomiar składowych wektora prędkości przepływu gazu.

Konstrukcja sondy powstała w oparciu o termoanemometryczny układ pomiarowy, w którym w głowicy pomiarowej czujnik przyłączony jest bezpośrednio do mostka stałotemperaturowego i układu przetwarzania sygnału. Układ elektroniczny realizowany jest w technologii SMT, co pozwala na uzyskanie niewielkich rozmiarów głowicy, przy dobrych parametrach elektrycznych i termicznych. W głowicy z kompensacją temperatury umieszczony jest czujnik pomiaru temperatury. Sygnałem wyjściowym z głowicy jest napięcie zależne od mierzonej prędkości przepływu płynu. Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie dobrych parametrów metrologicznych układu przy zwiększonej odporności na zakłócenia i niewielkim koszcie głowicy pomiarowej. Umożliwia to wygodne prowadzenie pomiarów wielopunktowych przy zastosowaniu wielu głowic. Schemat ideowy pojedynczego układu sondy pomiarowej przedstawiono na Rysunku 2.

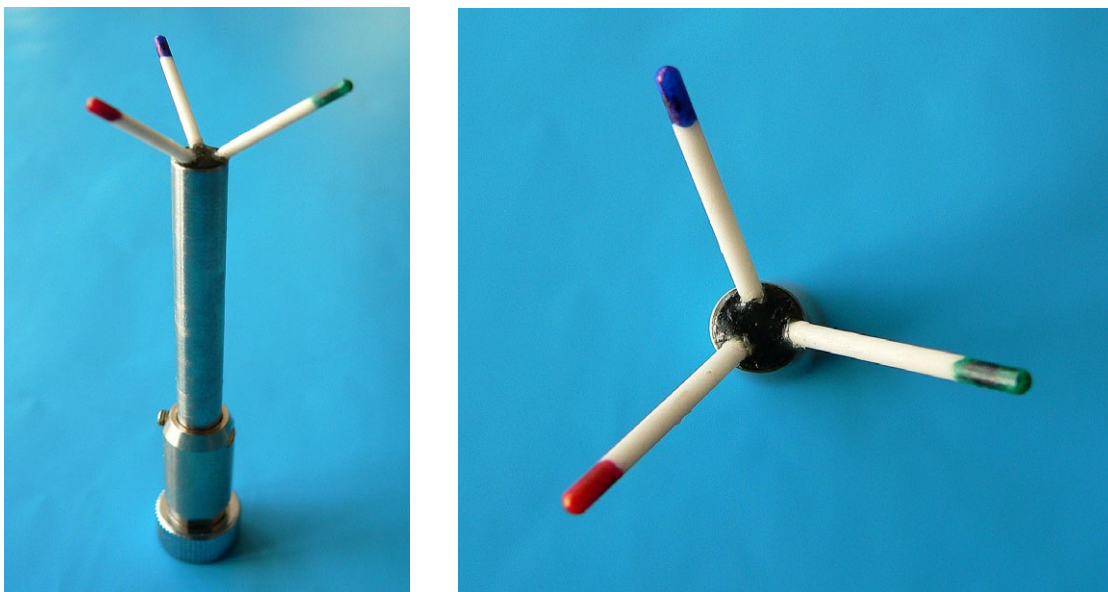
W zależności od rodzaju elementów pomiarowych, obsadzenia i wartości poszczególnych elementów elektronicznych realizowane są różne warianty sondy. Możliwa jest realizacja układu stałoprądowego do pomiarów termometrycznych oraz układu stałotemperaturowego do pomiarów termoanemometrycznych. Termoanemometr stałotemperaturowy pracuje w zmodyfikowanym układzie mostkowym z kompensacją temperatury. Po zastąpieniu elementów kompensacji temperatury rezystorami układ nie jest skompensowany.



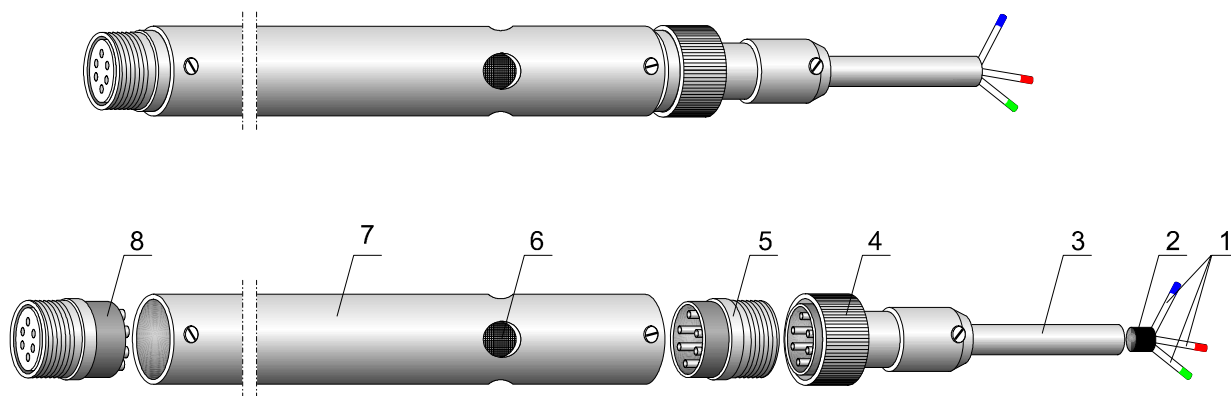
Rys. 2. Schemat ideowy pojedynczej zintegrowanej sondy termooanemometrycznej

Jako elementy pomiarowe mogą zostać zastosowane czujniki platynowo-ceramiczne lub czujniki drutowe do pomiaru przepływów szybkozmiennych. Sonda symetryczna złożona z dwóch identycznych układów pozwala na detekcję zwrotu wektora prędkości.

Sonda przeznaczona do wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu składa się z trzech termooanemometrów, które umożliwiają przetwarzanie sygnałów pomiarowych pochodzących z każdego z trzech elementów pomiarowych, którymi są specjalistyczne cylindryczne sensory platynowo-ceramiczne [5]. W poprzednich wersjach głowicy czujnik był na stałe zintegrowany z układem termooanemometrycznym. Czujnik do wyznaczania składowych wektora prędkości stanowi część wymienną, jest osadzany w złączu kontaktowym głowicy. Bazę pomiarową czujnika do wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu tworzy układ trzech miniaturowych cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych ustawionych w przestrzeni w taki sposób, że ich osie podłużne tworzą naroże sześcianu, natomiast oś sondy jest jego przekątną. Kąt pomiędzy osią sensora a osią sondy wynosi 54.7° . Fot. 3 przedstawia prototyp czujnika przemysłowego do wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu.



Fot. 3. Czujnik do wyznaczania składowych wektora prędkości w warunkach przemysłowych

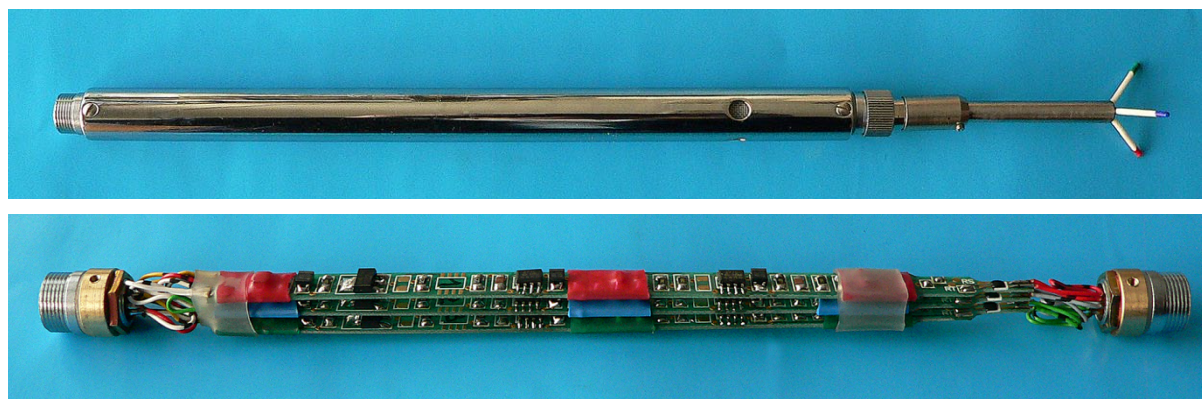


Rys. 3. Schemat złożeniowy potrójnej głowicy zintegrowanej do wyznaczania składowych wektora prędkości

Opracowany czujnik (Fot. 3, Rys. 3) składa się z: trzech cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych – 1, izolatora, w którym zamocowano sensory, równocześnie izolującego elektrycznie elementy mierzące i stabilizującego ich przestrzenny układ – 2, rurki stalowej o średnicy zewnętrznej 6 mm – 3 oraz sześciostykowego, specjalistycznego złącza kontaktowego – 4. Złącze sondy ma swój odpowiednik w postaci gniazda w potrójnej głowicy termoanemometrycznej – 5. Czujnik jest połączony z potrójnym układem termoanemometrycznym, którego osłonę stanowi korpus o średnicy 15 mm – 7, w poboczniczy nawiercone są otwory z siatkami zabezpieczającymi przed zanieczyszczeniem – 6, które umożliwiają swobodny dopływ medium do termometrów znajdujących się na trzech płytkach jednostronnie drukowanych i montowanych w technice SMT, tworzących potrójny system termoanemometryczny. Korpus sondy jest zakończony złączem kontaktowym – 8, do którego przyłączany jest przewód wyprowadzający sygnały napięciowe z poszczególnych elementów mierzących. Głowicę pomiarową z potrójnym czujnikiem oraz układ termoanemometryczny głowicy przedstawia Fot. 4.

W pierwszym etapie wykonania wymiennego czujnika, cylindryczne sensory są umieszczane w izolatorze, w którym uprzednio nawiercono trzy pary otworków symetrycznie względem środka, parami co 120°. Ponieważ doprowadzenia sensora są bardzo cienkie należy je wstępnie umocować w izolatorze szybkowiążącym klejem. W dolnej części izolatora znajduje się komora, w której wykonuje się odizolowanie doprowadzeń sensorów za pomocą elastycznego kleju silikonowego. Następnie cienkie i elastyczne kabelki w trzech kolorach łączy się odpowiednio z parami doprowadzeń poszczególnych sensorów.

Kolejny krok polega na wklejeniu izolatora do stalowej rurki korpusu. Po wklejeniu, wystające końce przewodów lutuje się odpowiednio z poszczególnymi stykami złącza. Konieczna jest w trakcie tych czynności duża precyzja i ostrożność, aby nie uszkodzić delikatnych doprowadzeń sensorów. Po złożeniu wszystkich elementów korpusu ustawia się przestrzenną konfigurację elementów mierzących za pomocą specjalnego wzorca. Odpowiednio ustawione sensory stabilizuje się na zewnętrznej powierzchni izolatora za pomocą kleju. Zmontowany czujnik należy przechowywać tak, by nie uszkodzić elementów mierzących i nie zmienić ich przestrzennej orientacji.



Fot. 4. Sonda (głowica) zintegrowana do wyznaczania składowych wektora prędkości przepływu

5. Parametry techniczne sondy

Termoanemometryczna sonda zintegrowana do wyznaczania składowych wektora prędkości posiada następujące parametry techniczne:

- współczynnik nagrzania – 1.2,
- zakres mierzonych prędkości – $0 \div 10$ m/s,
- zakres temperatury – $0 \div 60$ °C,
- napięcie wyjściowe – $0 \div 10$ V,
- napięcie zasilania – 12 V,
- masa – 270 g.

Podziękowania: Rezultaty prac przedstawione w artykule stanowią wyniki realizacji Projektu Badawczego 4 T12A 008 30, artykuł opracowano w celach dokumentacyjnych w ramach Prac Statutowych 2025 Instytutu Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.

Literatura

- [1] Roszczyński W., Trutwin W., Waclawik J., *Kopalniane pomiary wentylacyjne*. wyd. „Śląsk”, Katowice 1992.
- [2] Kruczkowski J., *Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym*. Praca doktorska IMG PAN Kraków, 1999.
- [3] Ligęza P., *Układy termoanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie nr 98, Kraków 2001.
- [4] Ligęza P., Poleszczyk E., *Badanie właściwości cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych w aspekcie konstrukcji sondy do wyznaczania wektora prędkości przepływu w warunkach kopalnianych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2007.
- [5] Ligęza P., Poleszczyk E., *Hybrydowy termoanemometryczny system pomiaru składowych wektora prędkości przepływu powietrza w wyrobisku górniczym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2007.
- [6] Poleszczyk E., *Termoanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości*. Monografie Rozprawy, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2002.
- [7] Błocki J., Godlewski J., Pakoński K., *Gas Cooling for Silicon Strip Detectors*. Nuclear Instruments and Methods, 1993.
- [8] Bremhorst K., Graham L.J.W., *A fully compensated hot/cold wire anemometer system for unsteady flow velocity and temperature measurement*. Meas. Sci. Technol. 425-430, 1990.
- [9] Bruun H.H., *Hot-wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*. University Press, Oxford, 1995.
- [10] Drubka R.E., Tan-atchat J., Nagib H.M., *Analysis of Temperature Compensating Circuits for Hot-wires and Hot-films*; DISA Info. 5-14, 1977.
- [11] Elsner J., Drobnik St., *Metrologia turbulencji przepływów*. Ossolineum, Wrocław, 1995.
- [12] Ligęza P., Sitko S.J., *Problem kompensacji temperaturowej i linearyzacji w anemometrii stalotemperaturowej*. Metrologia i Systemy Pomiarowe nr 9, 1991.
- [13] Ligęza P., *Thermoanemometric method for measuring velocity and temperature in non-isothermal flows*. Archives of Mining Sciences nr 3, 1994.
- [14] Ligęza P., *Sposób kompensacji temperaturowej mostkowego termoanemometru stalotemperaturowego oraz mostkowy termoanemometr stalotemperaturowy skompensowany temperaturowo*. Patent PL 175092 B1, Warszawa, 1994.
- [15] Ligęza P., *High – precision CTA*. MST News, 4, 1997.
- [16] Ligęza P., *A modified temperature-compensation circuit for CTA*. Measurement Science and Technology, 9, 1998.
- [17] Ligęza P., *A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications*. Review of Scientific Instruments, 1, 2000.
- [18] Ligęza P., Poleszczyk E., *Termoanemometryczne metody pomiaru prędkości – aparatura pomiarowa w kopalni*. Archives of Mining Sciences, Vol. 49, Special Issue, 2004.
- [19] Ligęza P., Poleszczyk E., *Charakterystyki metrologiczne cienkowarstwowych sensorów platynowych w zastosowaniu do wielopunktowych pomiarów pola prędkości przepływu*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, nr 3-4, 2004.
- [20] Ligęza P., Poleszczyk E., *Koncepcja i badania modelowe sondy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, nr 3-4, 2004.

- [21] Ligęza P., Poleszczyk E., *Sonda termoanemometryczna do wielopunktowych pomiarów pola prędkości*. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, nr 8, 2005.
- [22] Ligęza P., Poleszczyk E., *Multipoint measurements of flow velocity fields*. Archives of Mining Sciences, Vol. 50, 2005.
- [23] Dziurzyński W., Trutwin W., Cierniak W., *Stany nieustalone w kopalnianych sieciach wentylacyjnych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Kraków, 1996.
- [24] Lomas C.G., *Fundamentals of hot wire anemometry*. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [25] Sakao F., *Constant temperature hot wires for determining velocity fluctuations in an air flow accompanied by temperature fluctuations*; J. Phys. E: Sci. Instrum. 913-916, 1973.
- [26] Skotniczny P., *Rozwój strugi powietrza w dyfuzorze prostokątnym*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, Seria: Monografie Rozprawy, Monografia nr 8, 2005.
- [27] Skotniczny P., *Symulacja przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych*. Przegląd Górniczy, 2004.
- [28] Elsner J.W., *Turbulencja przepływów*. PWN Warszawa 1985.
- [29] Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P., *Measurements of Velocity Profile in Heading with the Use of Integrated Hot-Wire Anemometric System*. Archives of Mining Sciences, Vol. 53, 2008.
- [30] Szymkat M., *Komputerowe wspomaganie w projektowaniu układów regulacji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; Warszawa, 1993.
- [31] Waluś St., *Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia, Gliwice, 2003.
- [32] Wala M.A., Jacob J.D. at al., *How scrubbers help ventilate the face during deep cut mining with a blowing curtain*. Proceedings :10-th U.S. Mine Ventilation Symposium / North American, Anchorage, AL, May 2004.
- [33] Branny M., Filipek W., *Numerical simulation of ventilation of blind drifts with a force-exhaust overlap system in condition of methane and dust hazards*. Archives of Mining Science vol. 53, 2, Kraków 2008.
- [34] Fluent Inc. *User manual*. 2005.

Application of the thermal anemometric airflow velocity measurement method in underground mining

Part 1 – Measurement probes

Abstract

Analysis and measurements of ventilation networks are an important element in examining the condition and course of the mine ventilation process. The efficiency and reliability of the ventilation network system influences the operational process and work safety in the mine. This article presents the concept and prototype of a thermal anemometric measurement system for multi-point velocity field measurements. The system is based on sensors integrated with a signal processing system. An array of such sensors, distributed throughout the examined cross-section of the excavation, cooperates with a portable, computer-based data acquisition system. This enables simultaneous, multi-point measurement of flow velocity within the examined cross-section. The sensors utilize a unique measurement system based on a modification of a constant-temperature bridge system with temperature compensation. This system is the subject of a patent by the authors. The developed measurement system was used to verify computer simulations of air flows in selected areas of mining excavations. This part of the publication series presents the concept of measuring sensor design.

Keywords: Mine ventilation; ventilation network measurements; measurement systems; thermal anemometry; temperature compensation; computer simulations