

# Optymalizacja rozmieszczenia czujników w sondzie do monitorowania oddechu w aspekcie pomiaru zwrotu wektora prędkości przepływu

KATARZYNA SOCHA, PAWEŁ JAMRÓZ, PAWEŁ LIGĘZA, ELŻBIETA POLESZCZYK

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

## Streszczenie

W artykule przedstawiono prototypowy układ termooanemometryczny wraz z dedykowaną sondą do pomiaru strumienia objętości przepływu, znajdującymi zastosowanie w systemach do monitorowania oddechu. W ramach realizowanych prac badawczych wykonano wielokanałowy termooanemometryczny układ pomiarowy w wersji do indywidualnej zabudowy oraz dwuwłókową sondę koncepcyjną. Działanie systemu przetestowano na stanowisku do wzorcowania. W oparciu o wykonane eksperymenty i zebrane wyniki wykonano optymalizację konstrukcji czujnika pod kątem lokalizacji włókna termometrycznego.

**Słowa kluczowe:** termooanemometria, monitorowanie oddechu

## 1. Wstęp

Jednym z częściej wykonywanych badań medycznych jest spirometria. Jest to badanie umożliwiające określenie wielkości objętościowych i przepływowych charakteryzujących układ oddechowy badanego pacjenta [Tomalak i in., 2004]. Wyróżnia się dwa typy spirometrów:

- objętościowe (np. mieszkowy, tłokowy), które mierzą bezpośrednio objętość wydychanego powietrza,
- przepływowe (termiczne, turbinkowe, ultradźwiękowe), mierzące pośrednio objętość poprzez pomiar przepływu przez specjalną głowicę.

Spirometria umożliwia ocenę czynności układu oddechowego, między innymi przy diagnozowaniu astmy oskrzelowej, przewlekłej obturacyjnej choroby płuc (POChP), a także schorzeń klatki piersiowej i opłucnej. Nieprawidłowe oddychanie może być przyczyną wielu chorób niezwiązanych bezpośrednio z układem oddechowym, np. nadciśnienia tętniczego. W celu detekcji schorzeń związanych z drogami oddechowymi, zespół pod kierownictwem prof. Andrzeja Kukwy z kliniki otorynolaryngologii, chorób głowy i szyi Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Olsztynie opracował spirometr nosowo-ustny, który pozwala na rejestrację chwilowych wartości parametrów oddechowych [Nitkiewicz i in., 2018]. Jego cenną zaletą jest możliwość wykorzystania do badania procesu oddychania w trakcie snu pacjenta. Wykorzystuje on termooanemometryczny moduł pomiarowy oraz trzy czujniki termooanemometryczne, opracowane i wytworzone w Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN, do jednoczesnego pomiaru przepływu powietrza z trzech otworów górnych dróg oddechowych: dwóch nosowych i ustnego. Z wykorzystaniem prototypowego układu pomiarowego wykonano szereg analiz parametrów oddechowych u wielu pacjentów. Z uwagi na zastosowanie w poszczególnych kanałach pomiarowych pojedynczych włókien pomiarowych i niewystarczającą liczbę informacji o przepływie w czujniku, napotkano na problem związany z identyfikacją stanu wdech/wydech. Dodatkowo, zastosowane czujniki nie pozwalały na kompensowanie zmian temperatury wpływającej na dokładność pomiaru strumienia objętości przepływu w procesie oddychania.

Możliwość detekcji zwrotu przepływu w termooanemometrycznym czujniku spirometrycznym przedstawiono już w pracy [Gawor i in., 1992]. W rozwiązaniu tym czujnik oddechu składał się z trzech włókien:

jednego anemometru i dwóch termometrów położonych symetrycznie po jego obu stronach. Na podstawie sygnału z anemometru określana była wartość prędkości, natomiast dane z czujników termometrycznych pozwalały na określenie zwrotu. Detekcja ta oparta była na pomiarze temperatury w dwu punktach położonych symetrycznie względem nagrzanego włókna anemometrycznego i określaniu chwil czasowych, w których jedno z włókien termometrycznych rejestrowało podwyższoną temperaturę w związku z obecnością śladu ciepłego, pochodzącego od grzanego włókna. Natomiast sygnał temperaturowy z włókna leżącego przed grzanym włóknem był wykorzystywany do korekcji temperaturowej. Było to rozwiązanie, które zastosowane w spirometrze prof. Kukwy potrzebowałoby 9 kanałów pomiarowych oraz dużej ilości obliczeń do realizacji algorytmu detekcji zwrotu przepływu w czujniku.

Opracowane i zaprezentowane w niniejszej pracy rozwiązanie umożliwia ograniczenie liczby kanałów pomiarowych bez jednoczesnego zmniejszania funkcjonalności całego systemu pomiarowego.

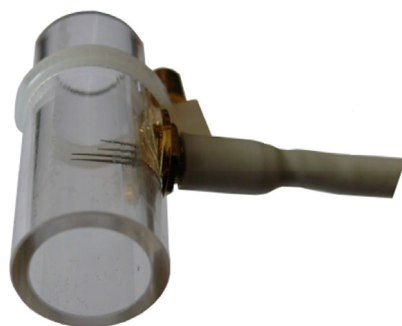
## 2. System pomiarowy

Z uwagi na potrzebę kontynuacji badań w zakresie spirometrii, z wykorzystaniem termoanemometrii, konieczne było ograniczenie liczby kanałów pomiarowych i uproszczenie algorytmów detekcji przy zachowaniu dotychczasowej funkcjonalności. W wyniku prac powstał prototypowy pojedynczy czujnik wykrywający zwrot przepływu, składający się z dwóch włókien pomiarowych oraz termoanemometryczny układ dedykowany do indywidualnej zabudowy.

### 2.1. Sonda pomiarowa

Opracowana sonda składa się z: czujnika do pomiaru strumienia objętości przepływu oraz czujnika temperatury umieszczonych w kanale pomiarowym (Rys. 1). Pierwsze włókno platynowane o średnicy  $7,5\ \mu\text{m}$  pracuje w układzie stałotemperaturowym jako anemometr. Na podstawie sygnału napięciowego wyznaczana jest wartość strumienia objętości przepływu. Natomiast drugie włókno pracuje w układzie stałoprądowym, jako termometr. Sygnał temperaturowy służy zarówno do detekcji kierunku przepływu (wdech/wydech), jak i do kompensacji temperaturowej sygnału z włókna pracującego w układzie stałotemperaturowym. Włókna zabudowane są w kanale przepływowym w postaci rurki poliwęglanowej o długości 40 mm i średnicy wewnętrznej 11 mm. Prototypowa wersja czujnika przedstawiona została na rysunku 1.

Zaletą takiego rozwiązania jest uproszczenie konstrukcji czujnika oraz zmniejszenie liczby kanałów, w stosunku do wcześniejszego rozwiązania [Gawor i in., 1992], biorących udział w algorytmie detekcji stanu wdech/wydech, przy jednoczesnym zachowaniu możliwości kompensacji temperaturowej włókna anemometrycznego. Dodatkowo ograniczenie liczby analizowanych sygnałów powoduje zmniejszenie liczby danych pomiarowych, które należy analizować w trakcie realizowania procedury identyfikacji stanu wdech/wydech.

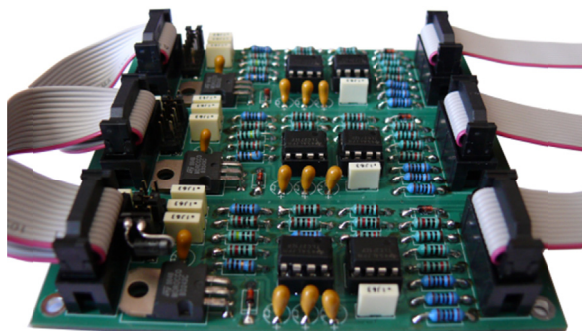


Rys. 1. Sonda pomiarowa

### 2.2. Termoanemometryczny system pomiarowy

W celu umożliwienia personalizacji obudów systemów pomiarowych zaprojektowano zminiaturyzowany termoanemometryczny układ w wersji OEM (Rys. 2). Został on oparty o istniejącą już konstrukcję ATU 08, umożliwiającą pracę poszczególnych kanałów w trybie pracy anemometrycznej (CTA) lub pracy

termometrycznej (CCT). Nowa konstrukcja umożliwia zabudowę dowolnej liczby kanałów pomiarowych, zgodnie z zapotrzebowaniem końcowego użytkownika. W dotychczasowym systemie monitorującym oddech, bez detekcji stanu wdech/wydech [Nitkiewicz i in., 2018], wykorzystywane były jedynie 3 kanały anemometryczne (CTA). Nowy układ monitorujący oddech wykorzystuje 6 kanałów w tym 3 anemometryczne i 3 termometryczne. Poszczególne kanały pełnią funkcję przetworników sygnałów z czujników na napięciowe sygnały wyjściowe, proporcjonalne do prędkości przepływu i temperatury badanego medium i mogą być łączone z dowolnymi systemami akwizycji danych przetwarzających analogowe sygnały pomiarowe na ich cyfrową reprezentację.



Rys. 2. Układ termooanemometryczny

### 3. Analiza własności metrologicznych

#### 3.1. Pomiar strumienia objętości przepływu

W celu przebadania własności sondy konieczne było zestawienie stanowiska pomiarowo-wzorcującego. Wykorzystano stanowisko do wzorcowania przepływomierzy wyposażone w zadajnik przepływu w postaci wentylatora promieniowego, sterowanego za pomocą falownika, oraz w kanał pomiarowy z kryzą kwadrantową do pomiaru małych strumieni objętości przepływu (Rys. 3). Stanowisko wzorcowe połączono z precyzyjnym ciśnieniomierzem różnicowym typu RUSKA 7050lp. Aktualne ciśnienie barometryczne było monitorowane barometrem DPI 142, a temperaturę i wilgotność powietrza wyznaczono z elektronicznego termohigrometru EE31.



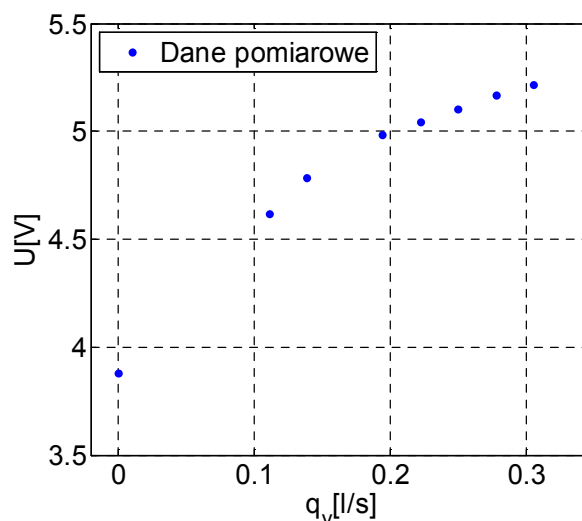
Rys. 3. Stanowisko pomiarowe

W wyniku wzorcowania uzyskano zależność pomiędzy napięciem wyjściowym z kanału przetwornika termooanemometrycznego  $U$ , a strumieniem objętości przepływu  $q_v$  wyznaczonym przy pomocy stanowiska wzorcowego. Wyniki wzorcowania przedstawiono w tabeli 1 oraz w postaci wykresu na rysunku 4.

W wyniku wzorcowania uzyskano nieliniową charakterystykę zależności  $q_v(U)$ . Kształt otrzymanej charakterystyki jest zbliżony z charakterystykami wyznaczanymi dla zależności prędkości przepływu

Tab. 1. Wyniki wzorcowania

$q_v$ [l/s]	$U$ [V]
0,000	3.88
0.111	4.62
0.139	4.78
0.194	4,98
0.222	5.05
0.250	5.10
0.278	5.17
0.306	5.22



Rys. 4. Dane pomiarowe do wzorcowania

od napięcia wyjściowego standardowych przetworników termooanemometrycznych, dlatego też w celu określenia funkcji przetwarzania przyjmuje się podobny schemat postępowania, jak w przypadku pomiaru prędkości.

W klasycznym ujęciu wzorcowanie jest procesem mającym na celu ustalenie relacji pomiędzy wartościami wielkości mierzonej, wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami wielkości fizycznych, realizowanymi przez wzorzec jednostki miary. W przypadku wzorcowania przyrządów do pomiaru strumienia objętości przepływu polega to na ustaleniu relacji pomiędzy poprawnie mierzonymi wartościami strumienia objętości przez system wzorcowy  $q_{V_r}$ , a odpowiadającymi im strumieniami objętości wskazywanymi przez wzorcowany przyrząd pomiarowy  $q_v$ . Dla wykonywanych w Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górotworu PAN termooanemometrów włóknowych proces wzorcowania jest bardziej złożony. W jego trakcie wyznaczane są również parametry funkcji przetwarzania, pozwalającej na ustalenie relacji pomiędzy napięciem wyjściowym termooanometru (sygnałem pomiarowym), a wartościami wskazywanymi przez wzorzec pomiarowy. Proces wzorcowania przyrządu połączony jest z jego adiustacją, w wyniku której otrzymywane są parametry funkcji przetwarzania, z wykorzystaniem poszukiwania minimum funkcji (1):

$$\left[ \left[ (U_1^2 - A)B \right]^n - q_{V_r} \right]^2 = \min \quad (1)$$

gdzie:  $A, B, n$  – parametry charakterystyki włókna,  $U_1$  – napięcie pomiarowe z włókna pracującego w układzie stałotemperaturowym,  $q_{V_r}$  – zadawany strumień objętości na stanowisku wzorcowym.

W wyniku zastosowania procedur optymalizacyjnych uzyskano współczynniki funkcji przetwarzania (2) o wartościach przedstawionych w tabeli 2.

$$q_v = \left[ (U_1^2 - A)B \right]^n \quad (2)$$

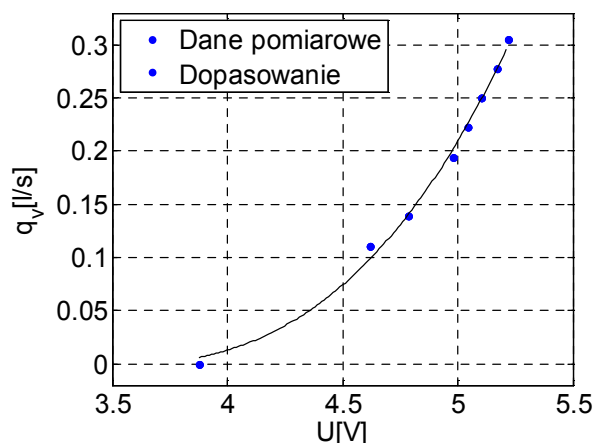
gdzie:  $q_v$  – mierzony strumień objętości.

Określenie parametrów funkcji przetwarzania (2) pozwala na wykorzystanie w pomiarach zależności pozwalającej na estymację chwilowych wartości prędkości przepływającego medium  $q_v$  na podstawie chwilowych wartości sygnału napięciowego z przetwornika. Zależność ta stanowi podstawę do wyznaczania strumienia objętości na podstawie znanych wartości napięcia wyjściowego oraz parametrów  $A, B$  oraz  $n$  określonych w trakcie wzorcowania.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki wzorcowania sondy do monitorowania oddechu wraz z dopasowanymi charakterystykami na podstawie zależności (2) i wartości współczynników określonych w tabeli 2.

Tab. 2. Współczynniki funkcji przetwarzania

A	B	n
12,6083	0,0390	2,1493



Rys. 5. Wyniki wzorcowania – dopasowanie zależności (1) do danych pomiarowych

### 3.2. Pomiar temperatury

Na podstawie zmierzonych chwilowych wartości napięcia  $U_2(T)$  w torze stałoprądowym termooanemometru wyznaczana jest wartość temperatury medium  $T$  zgodnie z zależnością (3):

$$T = \frac{U_2(T) - U_2(T_0)}{\alpha U_2(T_0)} + T_0 \tag{3}$$

gdzie:  $U_2(T)$  – chwilowa wartość napięcia z drugiego włókna (termometru),  $U_2(T_0)$  – napięcie wyjściowe toru termometru w temperaturze wzorcowania  $T_0$ ,  $\alpha$  – temperaturowy współczynnik rezystancji dla materiału elementu czynnego termometru w temperaturze wzorcowania  $T_0$ .

Wartość współczynnika  $\alpha$  przyjęto na podstawie dostępnych danych literaturowych [Cierniak, 2009] dotyczących właściwości wolframowych włókien termooanemometrycznych. Wynosi on 0.0036 1/K. Wartość  $U_2(T_0)$  uzyskano podczas wzorcowania włókna drugiego w temperaturze  $T_0 = 22.3^\circ\text{C}$ .

### 4. Położenie czujnika termometrycznego

W celu określenia optymalnej pozycji czujnika termometrycznego względem czujnika termooanemometrycznego, tak aby mierzona wartość temperatury nie była zakłócana poprzez nagrzane włókno termooanemometru, przeprowadzono badania śladu cieplnego za nagrzanym włóknom. Pomiar temperatury za grzanym włóknom przeprowadzono za pomocą pojedynczego czujnika o średnicy włókna 3  $\mu\text{m}$ , który pracował w układzie stałoprądowym. Włókno anemometryczne w sondzie oddechowej pracowało z rezystancją 4,88  $\Omega$ . Jako początek układu współrzędnych przyjęto położenie włókna grzanego. Czujnik temperaturowy umieszczono w odległości około 1 mm od włókna grzanego. Pomiaru wykonano od 1 mm powyżej włókna do 7 mm poniżej. Do 3 mm poniżej grzanego włókna sondę przesuwano co 0,5 mm, później co 1 mm. W osi poziomej czujnik przesuwano co 3 mm do końca kanału pomiarowego (krawędzi obudowy). Eksperyment przeprowadzono na stanowisku opisanym w punkcie 3.1, przy strumieniu objętości przepływu wynoszącym 0,11 l/s, będącym jednym z najmniejszych możliwych do uzyskania. Podłużna oś czujnika pokrywała się z podłużną osią stanowiska pomiarowego i odpowiadała pozycji czujnika, w jakiej prowadzone są badania spirometryczne. Na rysunku 6 przedstawiono sposób umieszczenia pojedynczej sondy w czujniku do monitorowania oddechu.

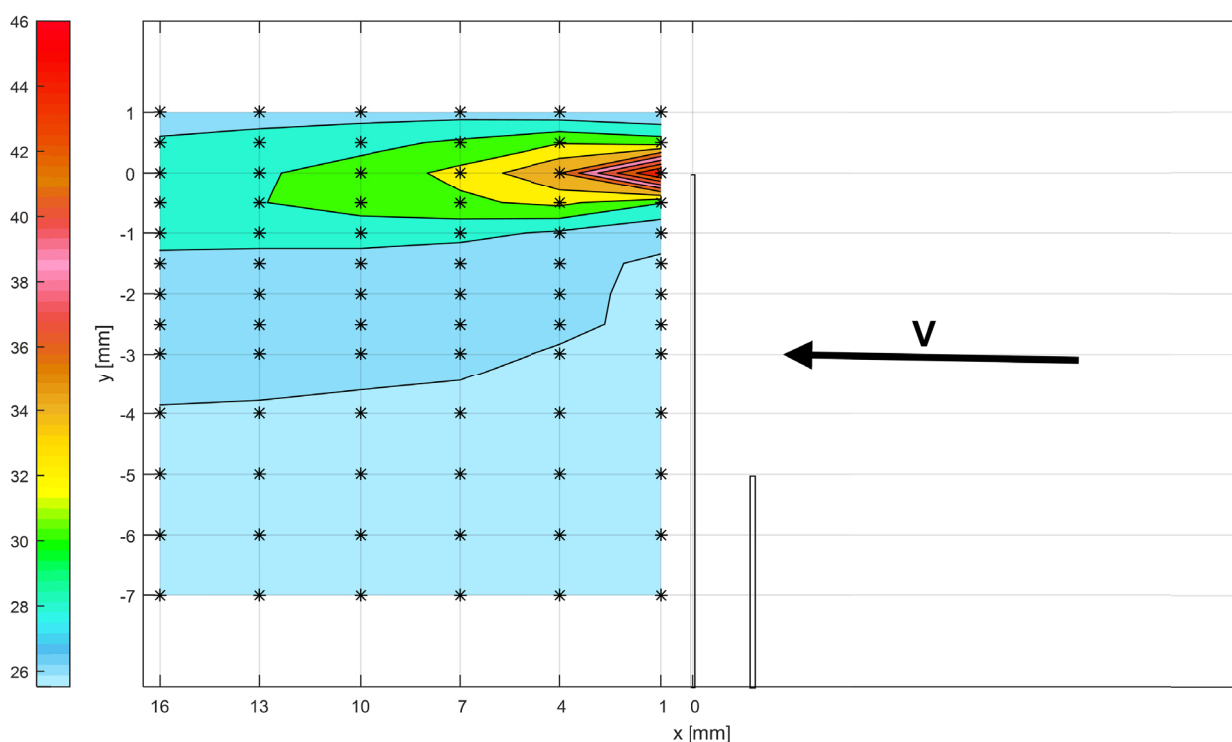
Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów pola temperatury. Dodatkowo zaznaczono również położenie wsporników włókien: anemometrycznego (wyższy prostokąt, którego wierzchołek znajduje się w początku układu współrzędnych) i termometrycznego (niższy prostokąt). Gwiazdkami zaznaczono punkty pomiaru wartości temperatury.

Dla przyjętego strumienia objętości przepływu i danej pozycji czujnika w stosunku do kierunku napływu, największe oddziaływanie grzanego czujnika na temperaturę przepływu w czujniku obserwowane jest



Rys. 6. Sposób umieszczenia pojedynczej sondy w opracowanym spirometrze do pomiaru zmian pola temperaturowego za grzanym włóknem

w zakresie do 1,5 mm poniżej i powyżej grzanego włókna. W obszarze 4 mm poniżej, temperatura pozostaje stała i odpowiada wartości temperatury przepływu. Pozwala to na określenie strefy, w której umieszczony czujnik termometryczny będzie rejestrował wartości temperatury związane jedynie z temperaturą przepływu i będzie poza strefą oddziaływania czujnika anemometrycznego. W prototypowej sondzie oddechu włókno temperaturowe zostało umieszczone na wysokości 5 mm poniżej włókna anemometrycznego i zostało oddalone od niego w kierunku wlotu o 2 mm, zatem znajduje się poza śladem cieplnym generowanym przez włókno anemometryczne.



Rys. 7. Pole temperaturowe za grzanym włóknem

## 7. Wnioski

Przedstawiony w pracy system do monitorowania oddechu ma na celu pomiar wartości strumienia objętości przepływu oraz detekcję stanu wdech/wydech. Dzięki umieszczeniu włókna termometrycznego poniżej strefy oddziaływania włókna grzanego, możliwe było określenie zwrotu przepływu za pomocą tylko

jednego termometru. Ograniczenie liczby kanałów pomiarowych umożliwia zastosowanie proponowanej sondy w bardziej zaawansowanych systemach pomiaru parametrów oddychania.

Praca została wykonana w 2018 roku w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

### Literatura

- Gawor M., Kielbasa J., Ligęza P., Poleszczyk E., Rachalski A., Rysz J., Sitko S., 1992: *Sonda do pomiarów parametrów oddechowych*. Konferencja Naukowa, Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne – COE'92. Zegrze – Warszawa 26-28 maj 1992, s. 347-350.
- Cierniak W., 2009: *Thermoanemometers*. Strata Mechanics Research Institute Polish Academy Of Science, Kraków.
- King L.V., 1914: *On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: Determination of the convection constants of small platinum wires, with applications to hot-wire anemometry*. Proceedings of the Royal Society of London.
- Nitkiewicz S., Barański R., Kukwa A., Zając A., 2018: *Respiratory disorders – measuring method and equipment*. Metrology And Measurement Systems 25 (1).
- Tomalak W, Antczak A., Boros P., Czajkowska-Malinowska M., Franczuk M., Gondorowicz K., Krzywiecki A., Radliński J., Siergiejko Z., Śliwiński P., Wesołowski S., Ziara D., 2004: *Zalecenia Polskiego Towarzystwa Ftyzjopneumonologicznego dotyczące wykonywania badań spirometrycznych*. IGiChP Oddział w Rabce.

## Wire location optimization in breath monitoring sensor

### Abstract

The paper presents a prototype thermoanemometric system with probe for measuring the flow volume, which can be used in respiratory monitoring systems. The framework of the task included designing, implementation and testing of the multi-channel thermoanemometric measurement system dedicated for individual development and a 2-wires concept sensor. Measurement system was tested on volumetric flow calibration stand. Based on performed experiments and collected results, the sensor construction was optimized for the location of the thermometric and anemometric wires.

**Keywords:** hot-wire anemometry, breath monitoring