

Badania właściwości metrologicznych zintegrowanych głowic do wielopunktowych pomiarów pól prędkości i temperatury przepływu gazu

PAWEŁ LIGĘZA, ELŻBIETA POLESZCZYK

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania laboratoryjne właściwości metrologicznych zintegrowanych głowic termooanemometrycznych. W Pracowni Metrologii Przepływów skonstruowano nowoczesny system termooanemometryczny do współczesnych, wielopunktowych pomiarów pól temperatury i prędkości w przepływie gazu.

Jego zasadniczą część tworzy zestaw głowic pomiarowych, które charakteryzują się bezpośrednim połączeniem czujnika z anemometrycznym układem zasilającym i przetwarzającym sygnał. W celu wykonania wielopunktowego, współczesnego pomiaru pola prędkości lub temperatury, głowice mogą być rozmieszczone w wielu punktach badanego profilu wyrobiska lub kanału wentylacyjnego.

Przedstawiono wyniki badań charakterystyk $U(v)$ głowic wyposażonych w element mierzący w postaci cienkowarstwowego sensora platynowo-ceramicznego oraz w wersji tradycyjnej z grzanym, cienkim włóknem metalicznym (druć wolframowy o średnicy 5 μm). Wykonano również charakterystyki kątowe głowic, w celu zoptymalizowania obudowy chroniącej element mierzący. Przebadano także głowice podwójne, w których dwa równolegle umieszczone miniaturowe sensory platynowo-ceramiczne umożliwiają detekcję zwrotu przepływu medium.

Opisane badania są traktowane jako wstępne testy laboratoryjne, po których będą wykonane pomiary w warunkach kopalnianych. Skonstruowany układ docelowo będzie zastosowany do eksperymentalnej weryfikacji numerycznej symulacji przepływu w wyrobisku węglowym.

Słowa kluczowe: zintegrowane głowice termooanemometryczne, sensor platynowo-ceramiczny, pomiar wielopunktowy

1. Wprowadzenie

W praktyce badań pola prędkości przepływu za pomocą metody termooanemometrycznej stosowano dotychczas typowy zestaw aparatury, składający się z wymiennych czujników pomiarowych, przewodu doprowadzającego oraz przyrządu pomiarowego stanowiącego układ zasilający czujnika i przetwarzania sygnału. Skonstruowany termooanemometryczny system wielopunktowego pomiaru prędkości przepływu gazu zakłada integrację czujnika z mostkiem stałotemperaturowym i układem przetwarzania sygnału pomiarowego. Powstała w ten sposób głowica pomiarowa, montowana w technice SMT umożliwia miniaturyzację całości i uzyskanie bardzo dobrych właściwości metrologicznych poprzez eliminację zakłóceń pochodzących od połączeń czujnika z przyrządem. Głowice zintegrowane posiadają swoją własną charakterystykę, dzięki temu mogą pełnić funkcję samodzielnego układu pomiarowego.

Dzięki zastosowaniu modyfikacji układu kompensującego wpływ temperatury [1] możliwe jest zastosowanie identycznych czujników do pomiaru prędkości i temperatury. Zaprojektowano głowice różnych typów, w zależności od wymagań zadania pomiarowego.

Ze względu na możliwość praktycznego wykorzystania układu pomiarowego w specyficznych warunkach, charakteryzujących się wysokim stopniem zanieczyszczenia i wilgotności medium, zastosowano jako element mierzący miniaturowy, cienkowarstwowo sensor platynowo-ceramiczny. Wstępne bada-

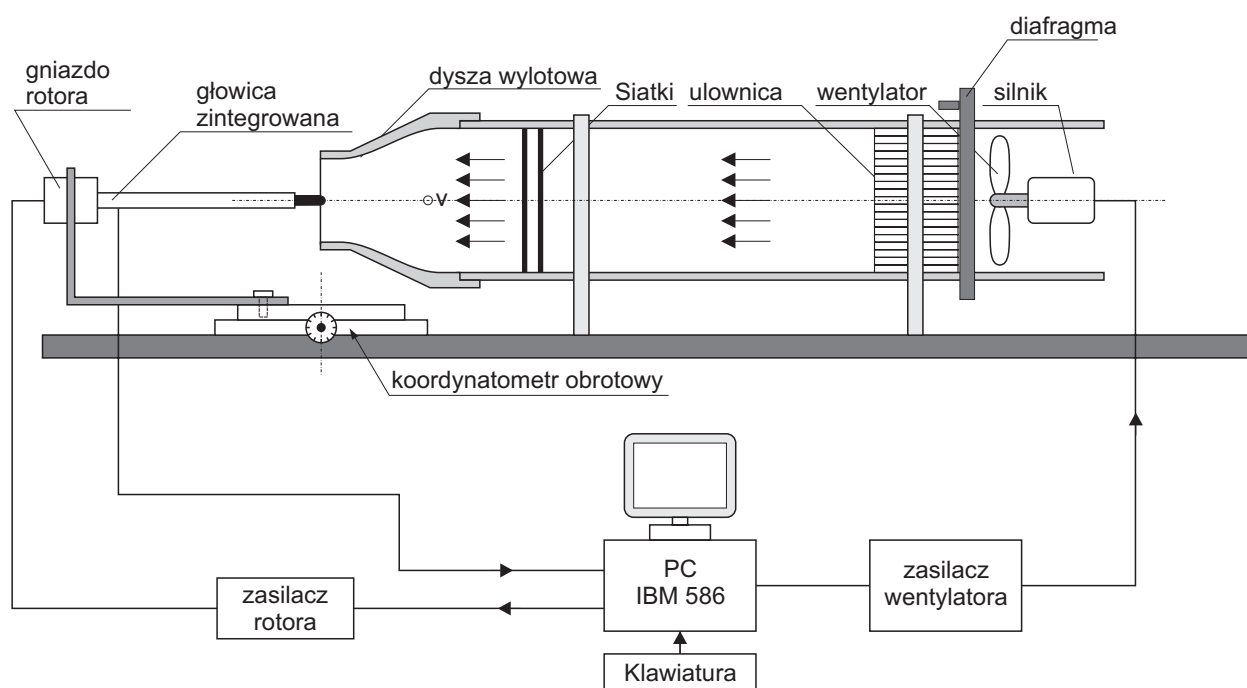
nia właściwości metrologicznych [2, 4] wykazały, że może on być stosowany jako element pomiarowy w aparaturze termoanemometrycznej, w miejsce mniej odpornych mechanicznie cienkich włókien metalicznych. Cienkowarstwowy czujnik platynowo-ceramiczny posiada stabilną charakterystykę. Istotną różnicę w stosunku do czujników drutowych stanowi wysokość przenoszonych częstotliwości – nie nadaje się do pomiaru bardzo szybkich fluktuacji przepływu.

W takich przypadkach można zastosować głowice wyposażone w tradycyjnie stosowany cienki drut anemometryczny, który jest odpowiednio chroniony przez osłonę głowicy przed uszkodzeniem mechanicznym. Dalsze rozwinięcie konstrukcyjne stanowią głowice podwójne wyposażone w dwa, usytuowane równolegle elementy mierzące, które umożliwiają detekcję kierunku i zwrotu przepływu gazu.

Zaprojektowany w Pracowni Metrologii Przepływów termoanemometryczny system wielopunktowych pomiarów pola prędkości i temperatury przepływu gazu stanowi ze względu na różnorodność dostępnych rozwiązań adaptacyjnych głowicy pomiarowej i wspólny dla dowolnej ilości czujników pomiarowych układ akwizycji i przetwarzania danych, nowoczesne i uniwersalne narzędzie do badań przepływu w warunkach specjalnych np. w wyrobisku węglowym.

2. Stanowisko pomiarowe

Badania właściwości metrologicznych zintegrowanych głowic pomiarowych przeprowadzono na uniwersalnym stanowisku pomiarowym, którego szczegółowy opis zawarty jest np. w pracy [3]. Rysunek 1 przedstawia schemat stanowiska.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

Odpowiednio wyposażony tunel aerodynamiczny umożliwia uzyskiwanie stabilnych prędkości przepływu w zakresie od 0 do 30 m/s oraz z tłumieniem za pomocą diafragmy – w zakresie od 0 do 5 m/s. Specjalne, wielofunkcyjne oprogramowanie wraz z systemem akwizycji i przetwarzania danych pozwala na automatyczne sterowanie, kontrolę i rejestrację parametrów przepływu. Uzyskiwane w zadanych warunkach przepływu dane pomiarowe są zapisywane i przetwarzane w wybrany sposób.

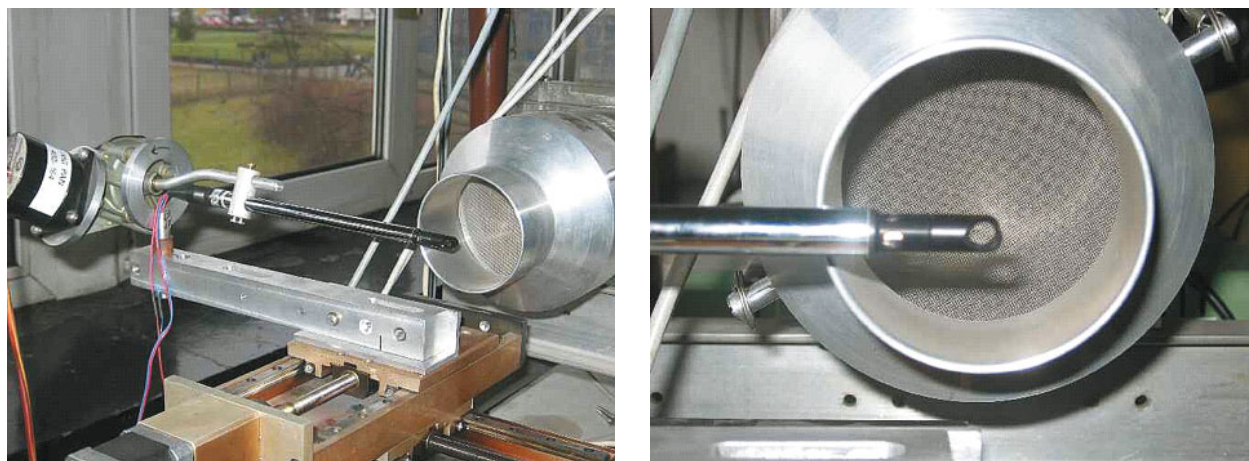
3. Badania właściwości metrologicznych głowic zintegrowanych

W zakresie badań laboratoryjnych właściwości metrologicznych termooanemometrycznych głowic zintegrowanych wykonano:

- charakterystyki $U(v)$ głowicy z sensorem platynowo-ceramicznym,
- charakterystyki kątowe głowicy z sensorem platynowo-ceramicznym,
- charakterystyki $U(v)$ głowicy z cienkim drutem anemometrycznym,
- charakterystyki kątowe głowicy z cienkim drutem anemometrycznym,
- badania układu dwóch równoległych sensorów platynowo-ceramicznych pod kątem detekcji kierunku i zwrotu przepływu.

1.1. Charakterystyki głowicy z sensorem platynowo-ceramicznym

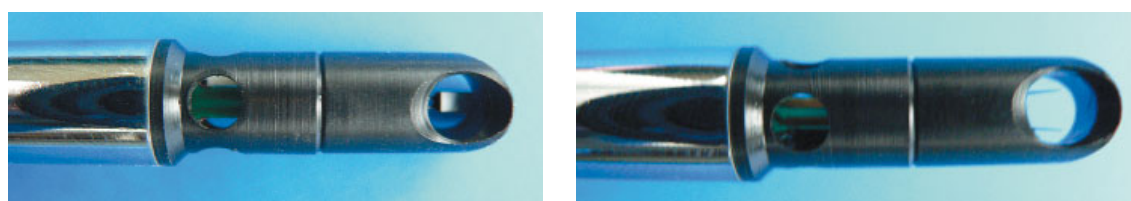
Badaną głowicę, której budowę szczegółowo opisuje praca [5], umieszczono na stanowisku badawczym w uchwycie zamontowanym do rotora, urządzenia sterowanego komputerowo, umożliwiającego obrót czujnika o dowolny kąt, zadawany automatycznie. Fot. 1-2 przedstawia głowicę pomiarową umieszczoną w ten sposób, że element mierzący w osłonie znajduje się w środku wylotu komory przepływowej tunelu, w wydmuchiwanym strumieniu powietrza.



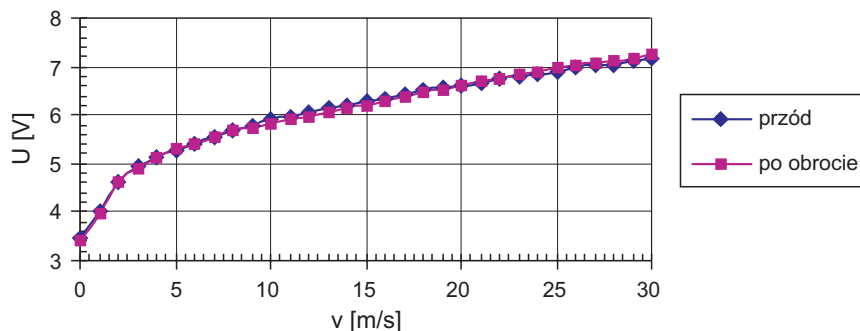
Fot. 1-2. Zintegrowana głowica termooanemometryczna na stanowisku pomiarowym

Element pomiarowy głowicy, którym jest miniaturowy cienkowsarstwowy sensor platynowo-ceramiczny w kształcie małej prostokątnej płytki o wymiarach 2.66×1.55 mm i grubości 1.06 mm, ma rezystancję na zimno około $R_0 = 100 \Omega$. Współczynnik nagrzania, przy którym realizowano pomiar charakterystyk wynosił $N = 1.2$. W pierwszym kroku wykonano charakterystyki prędkościowe $U(v)$ w dwóch zakresach prędkości: $0 \div 30$ m/s (bez tłumienia – diafragma otwarta) oraz $0 \div 5$ m/s (z tłumieniem – diafragma zamknięta). Charakterystyki były rejestrowane w położeniach: element mierzący prostopadły do kierunku prędkości i po obrocie o 180° .

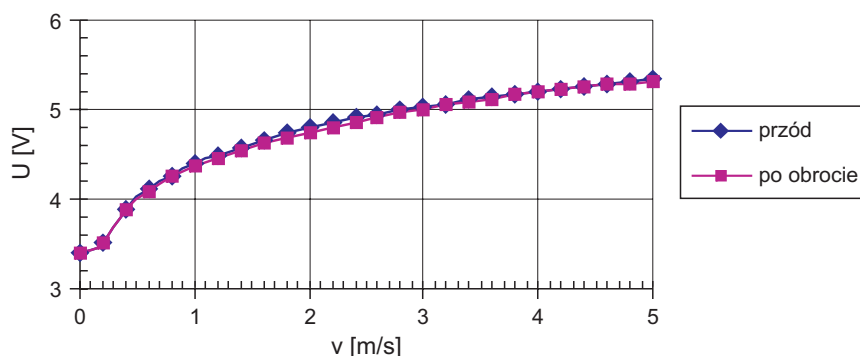
Fotografie 3-4 przedstawiają czujniki głowic w dwóch wariantach.



Fot. 3-4. Czujniki głowic termooanemometrycznych



Rys. 2. Charakterystyka $U(v)$ głowicy z cienkowarstwowym sensorem platynowo-ceramicznym w zakresie prędkości od 0 do 30 m/s



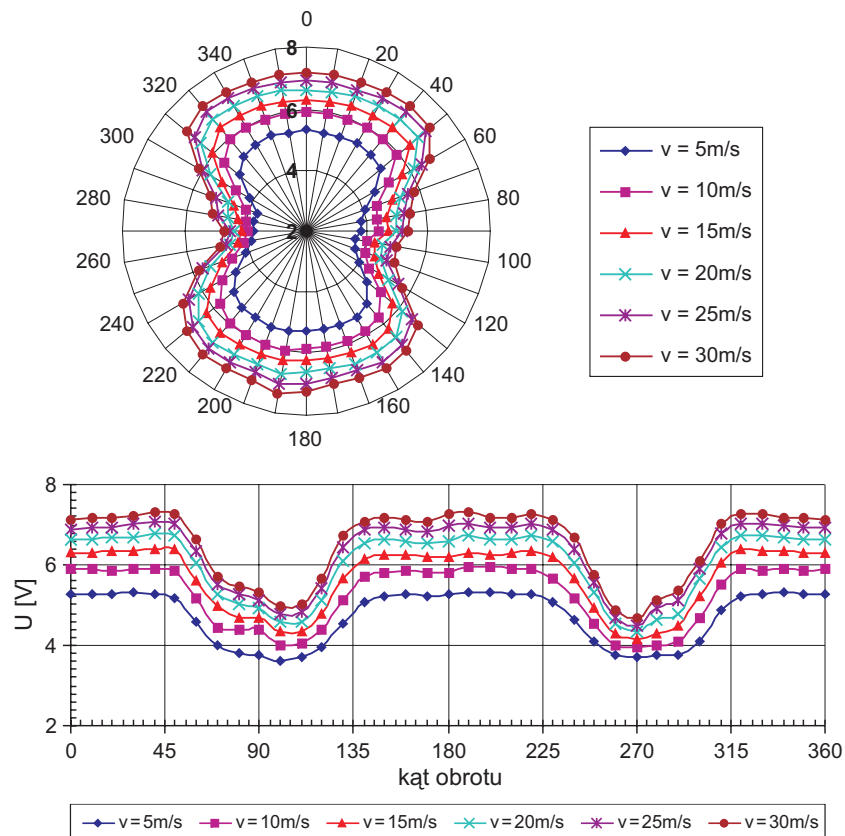
Rys. 3. Charakterystyka $U(v)$ głowicy z cienkowarstwowym sensorem platynowo-ceramicznym w zakresie prędkości od 0 do 5 m/s

Na podstawie przedstawionych wykresów (Rys. 2 i 3) można twierdzić, że wprowadzony w miejsce cienkiego drutu anemometrycznego sensor platynowo-ceramiczny może w niektórych przypadkach zastąpić. Odznacza się stosunkowo wysoką czułością, może więc być stosowany do pomiaru małych prędkości przepływu. Jako, że posiada małe wymiary, spełnia wymóg pomiaru zbliżonego do punktowego, dodatkowo charakteryzuje się dużą odpornością mechaniczną i stabilnością charakterystyki, a także prostotą montażu. Jednak ze względu na niższe pasmo przenoszonych częstotliwości [2] nie nadaje się do wysoko specjalizowanych pomiarów bardzo szybkich fluktuacji przepływu.

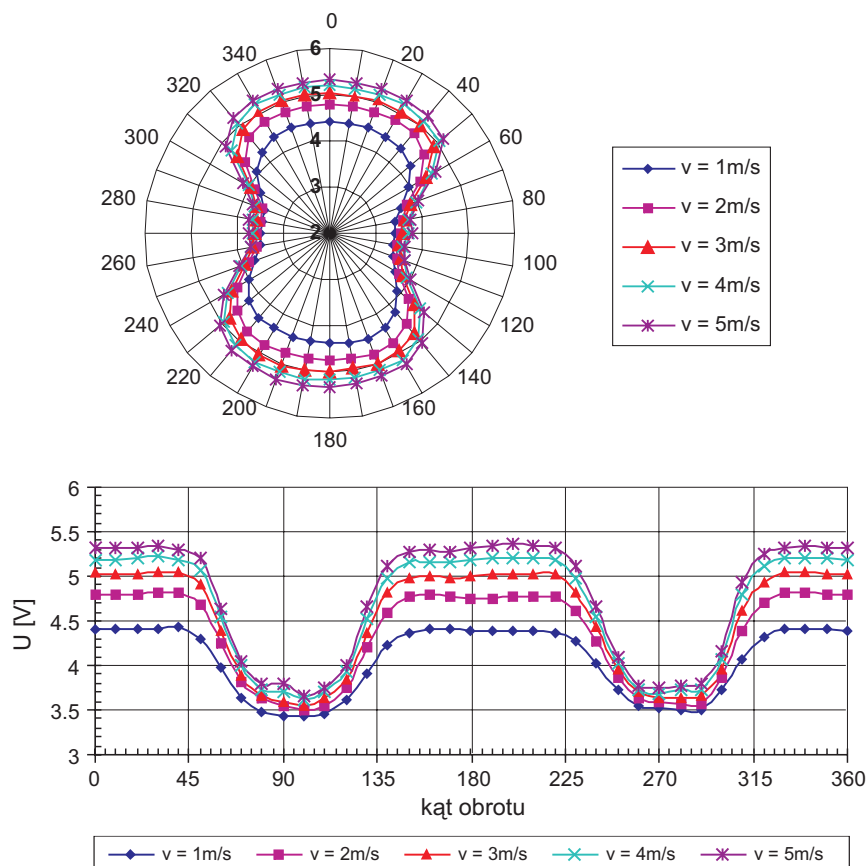
Wykonane dwukierunkowo charakterystyki wykazały, że zaprojektowana obudowa elementu mierzącego głowicy daje w przybliżeniu symetryczny wynik pomiaru.

Następnie zbadano kierunkowe właściwości zintegrowanej głowicy pomiarowej. Zarejestrowane charakterystyki kątowe głowicy (Rys. 4 i 5) pozwoliły na zoptymalizowanie kształtu obudowy elementu mierzącego głowicy. Testowaną głowicę umocowano za pomocą specjalnego ramienia w gnieździe rotora (Fot. 1-2). Sygnał napięciowy był rejestrowany z krokiem 10° obrotu głowicy wokół osi własnej. Charakterystyki były wykonane w pełnym zakresie prędkości od 5 do 30 m/s co 5 m/s oraz w zakresie małych prędkości od 1 do 5 m/s co 1 m/s.

Zbadanie wpływu kąta ustawienia głowicy pomiarowej względem kierunku przepływu na uzyskiwany sygnał napięciowy pozwoliło dobrać kształt osłony elementu mierzącego głowicy oraz profil geometryczny kanału przepływowego w tej obudowie tak, aby zoptymalizować przebieg sygnałów pomiarowych. Zaprojektowana osłona, jak wykazały badania pozwala na uzyskanie praktycznie płaskiej charakterystyki w szerokim zakresie kątów ustawienia czujnika w stosunku do kierunku napływającego gazu, a tym samym na zminimalizowanie błędów pomiarowych. Przy wykonywaniu pomiarów można w prosty sposób zdjąć osłonę.



Rys. 4. Charakterystyka kątowna głowicy z sensorem platynowo-ceramicznym dla prędkości: 5; 10; 15; 20; 25; 30 m/s.

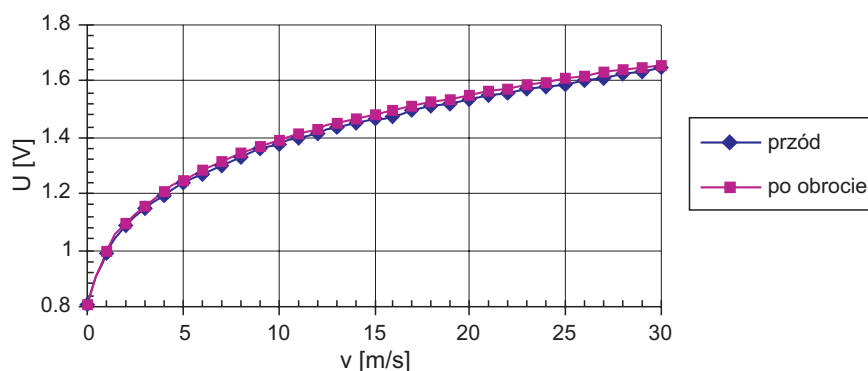


Rys. 5. Charakterystyka kątowna głowicy z sensorem platynowo-ceramicznym dla prędkości: 1; 2; 3; 4; 5 m/s.

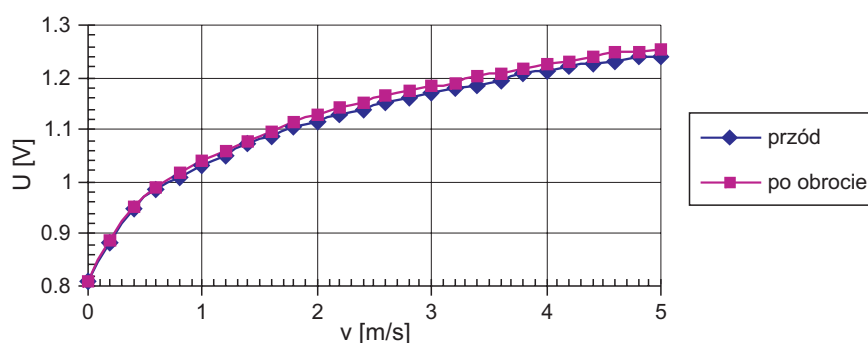
1.2. Charakterystyki głowicy z grzanym drutem

Zintegrowane głowice termooanemometryczne mogą być znakomitym narzędziem do mierzenia i rejestracji szybkich fluktuacji prędkości przepływu gazu, pod warunkiem, że rolę elementu mierzącego pełnić będzie cienki, kilkumikronowy drut anemometryczny. Znajdujący się w kanale przepływowym osłony drut jest mechanicznie zabezpieczony przed uszkodzeniem. W warunkach przepływu o wysokim stopniu zanieczyszczenia czas pracy tak wykonanej głowicy musi być krótszy niż przy zastosowaniu sensora platynowo-ceramicznego.

W celu zmierzenia charakterystyk $U(v)$ głowicy termooanemometrycznej w wersji tradycyjnej wykonano element mierzący w postaci drutu wolframowego o średnicy $5\ \mu\text{m}$ i długości ok. 3 mm rozpiętego na parze wsporników wlutowanych na odpowiednie pola płytki głowicy termooanemometrycznej. Rezystancja włókna „na zimno” wynosi ok. $12\ \Omega$, natomiast pomiar wykonywany był przy współczynniku nagrzania $N = 1.5$. Głowicę umieszczono analogicznie jak w poprzednich przypadkach i wykonano charakterystyki prędkościowe i kątowe w dwóch zakresach prędkości. Rysunki 6 i 7 przedstawiają wykresy charakterystyk $U(v)$ zarejestrowanych dla położzeń prostopadłych w stosunku do napływu.



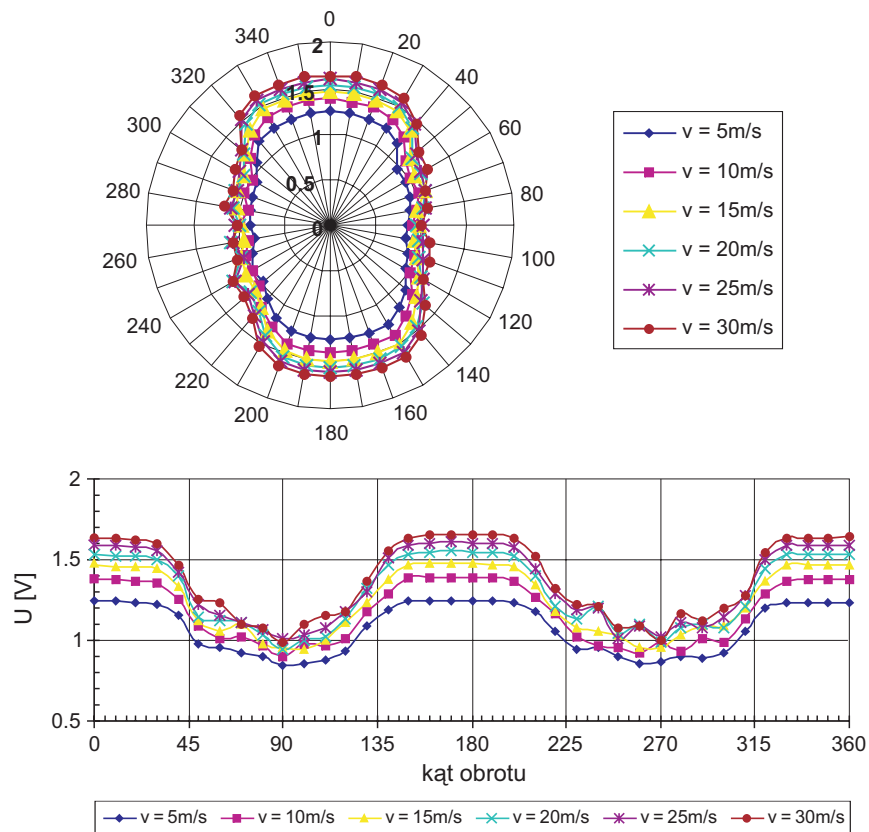
Rys. 6. Charakterystyka $U(v)$ głowicy z drutem wolframowym $5\ \mu\text{m}$ w zakresie prędkości od 0 do 30 m/s



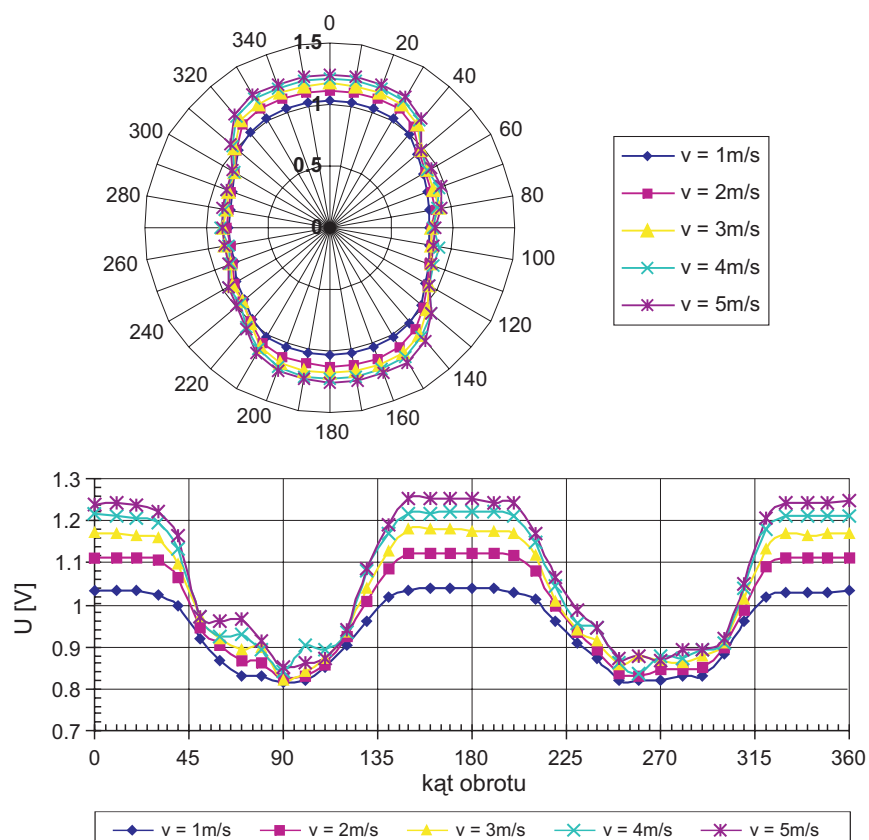
Rys. 7. Charakterystyka $U(v)$ głowicy z drutem wolframowym $5\ \mu\text{m}$ w zakresie prędkości od 0 do 5 m/s

Podobnie, jak na przebiegach charakterystyk dla głowicy z sensorem platynowo-ceramicznym, zauważyć można tutaj przybliżoną symetrię obustronnych charakterystyk. Niewielkie odchylenia mogą być wynikiem niedokładności wykonania kanału przepływowego głowicy lub minimalną niepowtarzalnością w ustawieniach względem kierunku przepływu głowicy przed i po obrocie o 180° .

Kolejne wykresy przedstawiają wykresy charakterystyk kątowych tej głowicy w przepływach o prędkościach z zakresu od 5 do 30 m/s co 5 m/s oraz dla małych prędkości: 1; 2; 3; 4; 5 m/s (Rys. 8 i 9). Umieszczona w uchwycie rotora głowica była obracana wokół osi własnej z krokiem 10° w obszarze kąta pełnego.



Rys. 8. Charakterystyka kątowna głowicy z drutem wolframowym 5µm dla prędkości: 5; 10; 15; 20; 25; 30m/s.



Rys. 9. Charakterystyka kątowna głowicy z drutem wolframowym 5µm dla prędkości: 1; 2; 3; 4; 5m/s.

Na wykresach charakterystyk kierunkowych przedstawionych graficznie w dwojaki sposób, można zauważyć podobnie jak w przypadku charakterystyk prędkościowych niewielką asymetrię, której prawdopodobne przyczyny omówiono wcześniej. Tak jak w przypadku głowicy z sensorem platynowo-ceramicznym obserwujemy korzystny efekt w obrazie charakterystyki uzyskany dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu kanału przepływowego w osłonie elementu mierzącego. W dużym zakresie kątów otrzymuje się w przybliżeniu płaską charakterystykę, co niewątpliwie wpływa na zmniejszenie niedokładności pomiaru. Tutaj również obserwujemy przy większych prędkościach narastanie niewielkich zakłóceń strumienia powstających na krawędziach kanału przepływowego osłony. Kolejny rysunek 9 potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia.

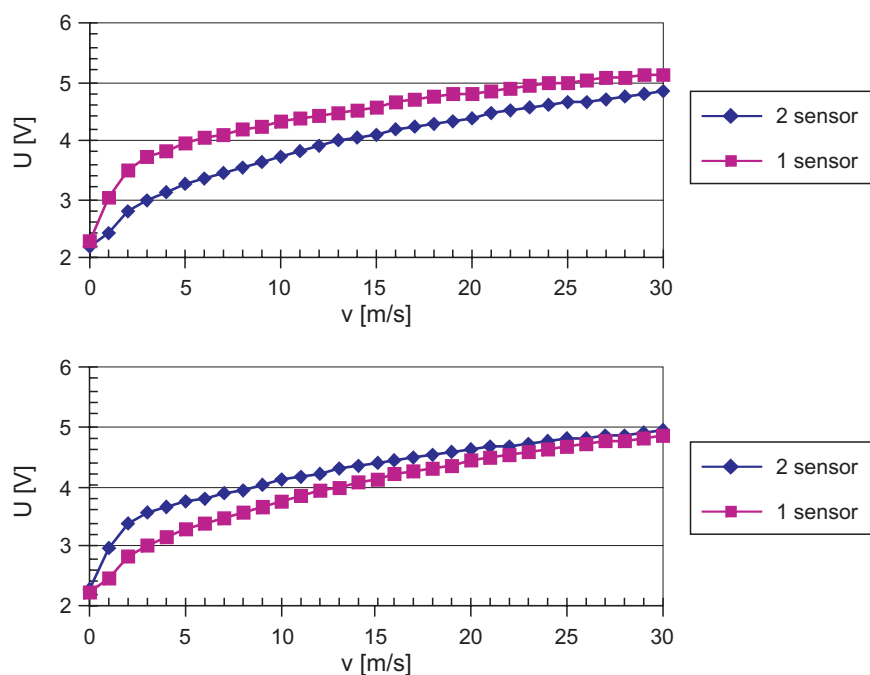
2. Detekcja kierunku i zwrotu przepływu

Często w praktyce pomiarów pola prędkości przepływu okazuje się interesującym lub koniecznym określenie kierunku i zwrotu wektora prędkości. Symetryczna sonda podwójna złożona z dwóch identycznych termooanemometrów umożliwia detekcję zwrotu wektora prędkości. Jest to możliwe dzięki rejestrowanej różnicy sygnałów napięciowych z dwu równoległych elementów mierzących. Budowa zintegrowanej głowicy termooanemometrycznej umożliwia złożenie w tej samej obudowie dwóch identycznych układów termooanemometrycznych.

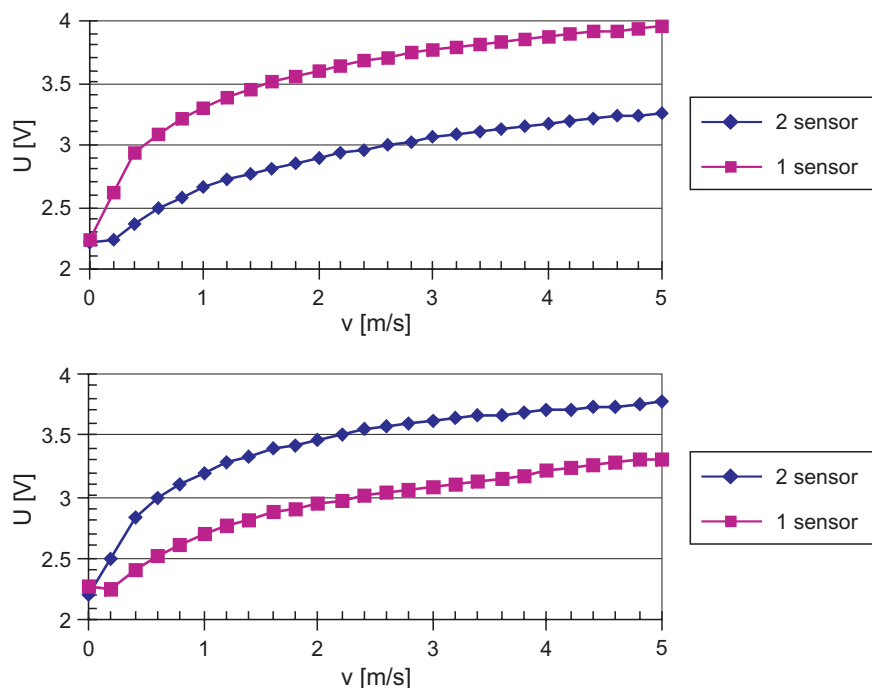
Ponieważ rozwiązanie problemu detekcji kierunku i zwrotu prędkości przepływu gazu w przypadku sond z drutem anemometrycznym znalazło już wiele alternatywnych rozwiązań, autorzy postanowili zbadać właściwości układu dwóch równoległych cienkowarstwowych sensorów platynowo-ceramicznych. Sensory zostały rozmieszczone blisko siebie z zachowaniem symetrii i równoległości płaszczyzn ceramicznych. Sensory zintegrowane z dwoma identycznymi zmodyfikowanymi mostkami stałotemperaturowymi tworzą układ który, jak wykazały badania eksperymentalne pozwala w prosty sposób określić kierunek i zwrot prędkości przepływu.

Badania polegały na zmierzeniu charakterystyk tego układu w dwóch zakresach prędkości oraz właściwości kierunkowych sondy z pakietem dwu równoległych sensorów.

Rysunki 10 i 11 przedstawiają charakterystyki sondy podwójnej w położeniu wyjściowym i po obrocie o 180° .



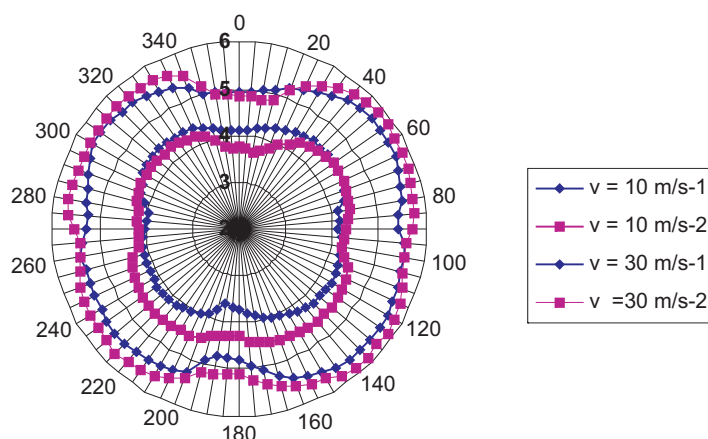
Rys. 10. Charakterystyki podwójnego czujnika do detekcji zwrotu w zakresie prędkości $0=30$ m/s w pozycji wyjściowej i obróconego o 180°



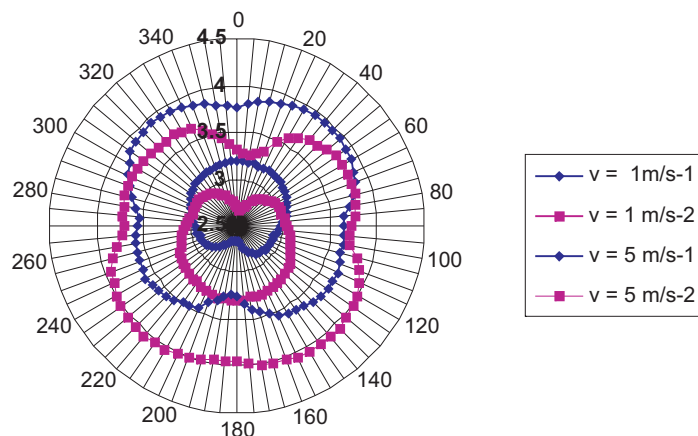
Rys. 11. Charakterystyki podwójnego czujnika do detekcji zwrotu w zakresie prędkości 0÷5 m/s w pozycji wyjściowej i obróconego o 180°

Na rysunku 10 widać wyraźnie różnicę sygnałów mierzonych sensorem położonym od strony nawietrznej i drugim będącym w jego „cieniu”. Sytuacja przedstawia się analogicznie po obrocie czujnika podwójnego o 180° – sensory zamieniają się rolami. Umieszczając taki czujnik w przepływie, możemy na podstawie różnicy sygnałów napięciowych określić kierunek i zwrot przepływu. Kolejny rysunek 11 przedstawia charakterystykę podwójnego czujnika w zakresie małych prędkości, gdzie efekt różnicy sygnałów napięciowych występuje jeszcze wyraźniej. Zdecydowanie większa różnica sygnałów napięciowych pochodzących z sensora nawietrzego i zawietrzego w przypadku małych prędkości przepływu jest oczywista. Sensor znajdujący się z tyłu, przesłonięty od strony napływającego medium jest w przypadku niewielkiej prędkości przepływu gorzej chłodzony, niż w strumieniu o dużej prędkości.

Poniżej zamieszczono wybrane wyniki badania właściwości kierunkowych sondy z detekcją zwrotu prędkości przepływu w postaci charakterystyk kątowych dla dwu prędkości: 10 i 30 m/s oraz z zakresu małych prędkości: 1 i 5 m/s, przedstawione w postaci wykresów radarowych.



Rys. 12. Charakterystyki kątowe sondy podwójnej dla prędkości 10 i 30 m/s



Rys. 13. Charakterystyki kątowe sondy podwójnej dla prędkości 1 i 5 m/s

3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodykę i wyniki badań laboratoryjnych zintegrowanych sond termooanemometrycznych w różnych wariantach rozwiązań konstrukcyjnych elementu mierzącego sondy.

System współczesnych pomiarów wielopunktowych pól prędkości i temperatury przepływu został skonstruowany z myślą o pomiarach w warunkach specjalnych np. w wyrobiskach czy kanałach wentylacyjnych. Zaprojektowana oferta różnych typów głowic pomiarowych [5] pozwoli na zastosowanie systemu do rozwiązywania złożonych problemów w praktyce pomiarów parametrów metrologicznych przepływów gazu, w szczególności powietrza. Dzięki nowoczesnej technologii uzyskano produkt, który może służyć w równym stopniu do pomiarów laboratoryjnych jak i przemysłowych. Przez bezpośrednie połączenie czujnika z mostkiem termooanemometrycznym wykonano układ posiadający własną charakterystykę i mogący pracować jako samodzielny termooanemometr, eliminując jednocześnie zakłócenia pochodzące od połączeń przewodami.

Przeprowadzono szczegółowe badania prototypowej głowicy zintegrowanej wyposażonej w czujnik pomiarowy w dwóch wersjach: cienkowarstwowego sensora platynowo-ceramicznego i cienkiego włókna metalicznego. Przebadano również wersję podwójnej głowicy z układem dwóch równoległych sensorów pozwalających na określenie kierunku i zwrotu przepływu na podstawie różnicy sygnałów pomiarowych.

Charakterystyki głowicy wyposażonej w sensor platynowo-ceramiczny wykazały, że może on w większości zagadnień pomiarowych zastąpić tradycyjnie stosowane w aparaturze termooanemometrycznej cienkie włókna metaliczne. Sensor posiada właściwości zbliżone do drutów anemometrycznych. W zakresie najczęściej mierzonych prędkości posiada odpowiednią czułość, równocześnie jego małe rozmiary gwarantują pomiar zbliżony do punktowego i znikomą inwazyjność. Niewątpliwie zaletami tego rozwiązania są również: odporność mechaniczna sensora, prostota montażu oraz jego koszty. Odpowiednio zaprojektowana osłona elementu mierzącego głowicy nie tylko nie powoduje znaczących zaburzeń przepływu ale również sprawia, że w pewnym zakresie kąta ustawienia sondy w stosunku do kierunku napływu błąd uzyskiwanego pomiaru jest minimalny.

Dzięki zastosowaniu zmodernizowanego mostka stałotemperaturowego z kompensacją temperatury czujniki temperatury i mierzący prędkość mogą być identycznymi sensorami platynowo-ceramicznymi.

W szczególnych przypadkach pomiarów bardzo szybkich fluktuacji przepływu element mierzący prędkość w głowicy wykonany jest w postaci drutu anemometrycznego, zabezpieczonego odpowiednią osłoną.

Konstrukcja głowicy umożliwia wykonanie układu podwójnego, który daje możliwość określenia kierunku i zwrotu przepływu na podstawie różnicy napięć uzyskiwanych z dwóch równoległych usytuowanych czujników zintegrowanych z niezależnymi układami anemometrycznymi.

Zaprojektowany termooanemometryczny system współczesnych pomiarów wielopunktowych pola temperatury i prędkości przepływu składający się z matrycy wybranej ilości głowic, układu przetwarzania

i akwizycji danych z autonomicznym zasilaniem jest w pełni przenośny i przemoże zostać zastosowany np. do eksperymentalnej weryfikacji numerycznej symulacji przepływu w wyrobisku węglowym.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2005 jako projekt badawczy nr 4 T12A 059 26 pt.: „Zastosowanie zmodyfikowanej termooanemometrycznej metody pomiaru prędkości gazu w specyficznych warunkach kopalnianych”.

Literatura

- [1] Ligęza P.: *A modified temperature – compensation circuit for CTA*, Meas. Sci. Technol., 3, 1998.
- [2] Ligęza P., Poleszczyk E.: *Multi-points measurements of gas flow velocity fields*, Archives of Mining Sciences, Vol. 50/4, 2005,
- [3] Poleszczyk E.: *Termooanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości*, Monografie Rozprawy, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), nr 1, 2002.
- [4] Ligęza P., Poleszczyk E.: *Charakterystyki metrologiczne cienkowarstwowych sensorów platynowych w zastosowaniu do wielopunktowych pomiarów pola prędkości przepływu*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute) 2004, t. 6, nr 3-4, s. 235-242.
- [5] Ligęza P., Poleszczyk E.: *Zintegrowana sonda do wielopunktowych, współczesnych pomiarów pól temperatury i prędkości przepływu gazu*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute) 2005, t. 7, nr 1-2, s. 27-33.

Experimental tests of metrological properties of integrated anemometric probes for measurements of velocity and temperature fields

Abstract

The study outlines the results of experimental tests of metrological properties of integrated hot-wire probes for measurements of velocity and temperature fields.

Special anemometric probes designed and developed by authors enable the measurements of temperature, flow velocity and detection of the flow velocity vector as well as measurements of fast changing flows. Voltage-velocity characteristics $U(v)$ were collected for probes complete with a sensitive element in the form of a thin platinum-ceramic sensor and for probes for fast-changing flow measurements, equipped with thin metallic hot wire (tungsten wire 5 μm in diameter). Angular characteristics were obtained in order to optimize the design of a housing that protects the sensitive element. Double measuring heads are also devised, in which two parallel minute platinum-ceramic sensor enable the detection of the flow velocity vector direction. Potential applications of integrated probes are explored. These laboratory tests mark a preliminary stage of the whole research program. In the next stage measurements will be taken in the mining conditions. The designed measuring system shall be applied to verification of numerical flow simulation in a mining excavation.

Keywords: integrated probe, multi-points measurements, sensors with platinum thin films

Recenzował: prof. dr hab. *Stanisław Gumuła*, Akademia Górniczo-Hutnicza