

Nowa metoda pomiaru małych prędkości w tunelu aerodynamicznym

WIESŁAW CHMIEL, ANDRZEJ KRACH, JANUSZ KRUCZKOWSKI, STANISŁAW MILLAK

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono wzorcowanie układu do pomiaru prędkości przepływu powietrza w tunelu aerodynamicznym z kryzą wielootworową. Do wzorcowania zastosowano metodę komparacyjną. Metoda ta polega na zrównaniu prędkości przepływu powietrza w komorze pomiarowej tunelu z prędkością ruchu sondy termooanemometru, który wówczas powinien pokazać prędkość zerową. Sonda termooanemometru przesuwa się w komorze pomiarowej tunelu ze stałą prędkością naprzemiennie zgodnie i przeciwnie do zwrotu prędkości powietrza. Prędkość powietrza w tunelu reguluje się tak, aby minima okresowego sygnału z termooanemometru obserwowane na ekranie oscyloskopu osiągnęły najniższe położenie (metoda minimum). Do ruchu sondy ze stałą prędkością może być dodana składowa sinusoidalna. Wówczas prędkość przepływu powietrza w tunelu reguluje się tak, aby w okresach ruchu sondy zgodnego z ruchem powietrza w sygnale z termooanemometru obserwowanym na ekranie oscyloskopu pozostała tylko druga harmoniczna prędkości, to jest prędkości okresowo zmiennej, nałożonej na prędkość stałą (metoda drugiej harmonicznej). Prędkość ruchu jednostajnego karetki z sondą termooanemometryczną mierzona jest za pomocą magnetycznego enkodera liniowego.

Wzorcowanie układu do pomiaru małych prędkości powietrza w tunelu aerodynamicznym zrealizowano w następujących krokach:

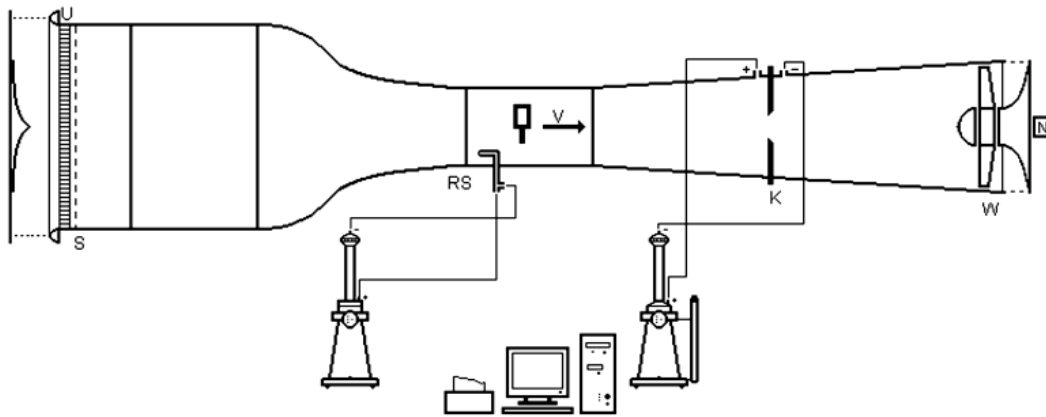
1. Wzorcowanie enkodera liniowego do pomiaru prędkości ruchu jednostajnego karetki z sondą termooanemometryczną w komorze pomiarowej tunelu.
 2. Wzorcowanie układu do pomiaru małych prędkości powietrza kryzą wielootworową dla prędkości 0,1 i 0,25 m/s:
 - a) pomiar zadanej prędkości ruchu karetki,
 - b) pomiar prędkości powietrza w tunelu z komparacją metodą drugiej harmonicznej,
 - c) pomiar prędkości powietrza w tunelu z komparacją metodą minimum.
- Po wykonaniu pomiarów obliczono niepewności wzorcowania w/w metodami.

Słowa kluczowe: wzorcowanie tunelu aerodynamicznego, pomiar małych prędkości powietrza, metoda komparacyjna

1. Wstęp

Pomiar prędkości powietrza w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego, znajdującego się w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN (Rys. 1), realizowany jest dwoma metodami w zależności od wartości prędkości. W zakresie (1,5÷40) m/s do pomiaru prędkości powietrza służy statyczna rurka Pitota w połączeniu z mikromanometrem hydrostatycznym, a w zakresie prędkości mniejszych od 1,5 m/s pomiar wykonywany jest za pomocą kryzy wielootworowej, zaprojektowanej przez prof. W. Trutwina, z pomiarem ciśnienia różnicowego mikromanometrem hydrostatycznym.

Wzorcowanie kryzy wielootworowej wykonał zespół pod kierunkiem prof. W. Trutwina w 1984 r. poprzez serie porównań z wynikami pomiarów prędkości powietrza statyczną rurką Pitota (Trutwin i in., 1984). Metoda ta pozwoliła wywzorcować kryzę w zakresie prędkości od 0,4 m/s i taką dolną granicę zakresu pomiarowego zatwierdził audytor PCA w zakresie akredytacji laboratorium. Aby realizować wzorcowania anemometrów w tunelu aerodynamicznym w akredytowanym zakresie prędkości od 0,1 m/s konieczne było wykonanie wzorcowania kryzy w zakresie prędkości powietrza (0,1÷0,4) m/s metodą zapewniającą



Rys. 1. Stanowisko do wzorcowania anemometrów.

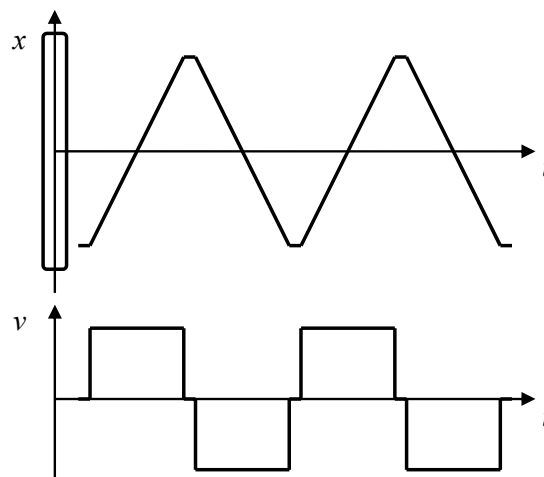
U – ulownica, S – siatka, RS – rurka spiętrzająca, K – kryza pomiarowa, W – wentylator, N – napęd wentylatora

spójność pomiarową, czyli powiązanie z państwowymi lub międzynarodowymi wzorcami jednostki miary za pośrednictwem nieprzerwanego łańcucha porównań, z których wszystkie mają określone niepewności.

2. Metoda pomiaru

Do wzorcowania układu do pomiaru małych prędkości powietrza kryzą wielootworową w tunelu aerodynamicznym TA-1 zastosowano metodę komparacyjną. Metoda ta polega na zrównaniu prędkości przepływu powietrza z prędkością ruchu sondy termooanemometru, przesuwanej się wzdłuż osi komory pomiarowej tunelu. Termooanemometr powinien wówczas pokazać prędkość zerową.

Na Rys. 2 pokazano drogę i prędkość ruchu sondy termooanemometru (bez składowej sinusoidalnej), przesuwanej się w szczelinie górnej płyty komory pomiarowej tunelu.



Rys. 2. Droga i prędkość ruchu sondy termooanemometrycznej

Wzorcowanie układu do pomiaru małych prędkości powietrza w tunelu aerodynamicznym zrealizowano się w następujących krokach:

1. Wzorcowanie enkodera liniowego do pomiaru prędkości ruchu karetki z sondą termooanemometryczną.
2. Wzorcowanie układu do pomiaru małych prędkości powietrza kryzą wielootworową dla prędkości 0,1 m/s i 0,25 m/s:
 - a) pomiar zadanej prędkości ruchu karetki,
 - b) pomiar prędkości powietrza w tunelu z komparacją metodą drugiej harmonicznej,
 - c) pomiar prędkości powietrza w tunelu z komparacją metodą minimum.

2.1. Metoda drugiej harmonicznej

W metodzie tej, opisaną przez J. Kiełbasę (2010), sonda termooanemometru porusza się w komorze pomiarowej tunelu naprzemian zgodnie z przepływem powietrza i przeciwnie do przepływu ze stałą prędkością, do której dodana jest składowa sinusoidalna. Prędkość powietrza względem prędkości ruchu sondy podaje wzór:

$$v = v_p - [v_s + a\varpi \sin(\varpi t)]$$

gdzie

- v_p – prędkość powietrza,
- v_s – prędkość stała sondy,
- a – amplituda składowej sinusoidalnej ruchu sondy,
- ω – częstość kątowna ruchu sinusoidalnego.

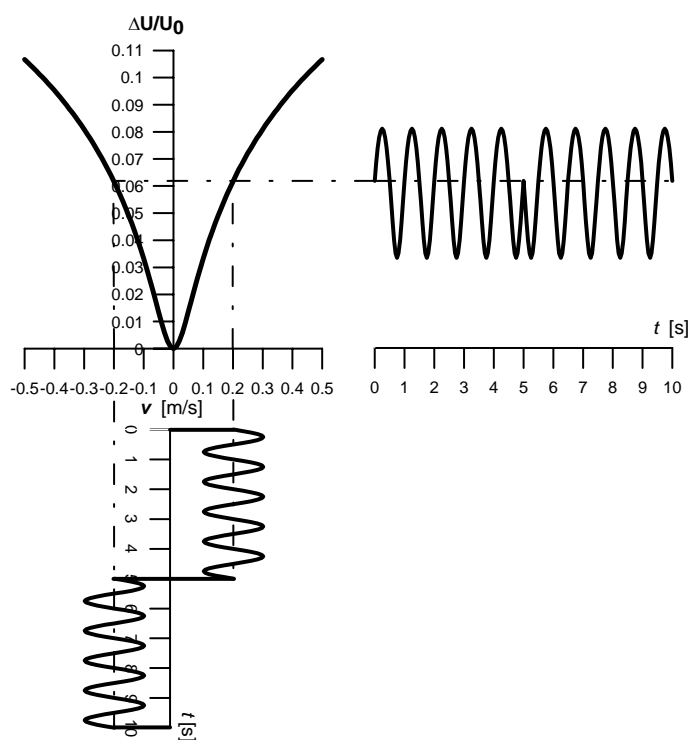
Względną prędkość powietrza wskazuje termooanemometr stałoprądowy. Sygnał z termooanemometru podawany jest na filtr dolnoprzepustowy w celu usunięcia zakłóceń od fluktuacji prędkości powietrza. Przebieg sygnału obserwowany jest na ekranie oscyloskopu.

Na Rys. 3 przedstawiono przebieg prędkości względnej sondy termooanemometru (na osi pionowej), charakterystykę termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego z termooanemometru dla prędkości powietrza $v_p = 0$.

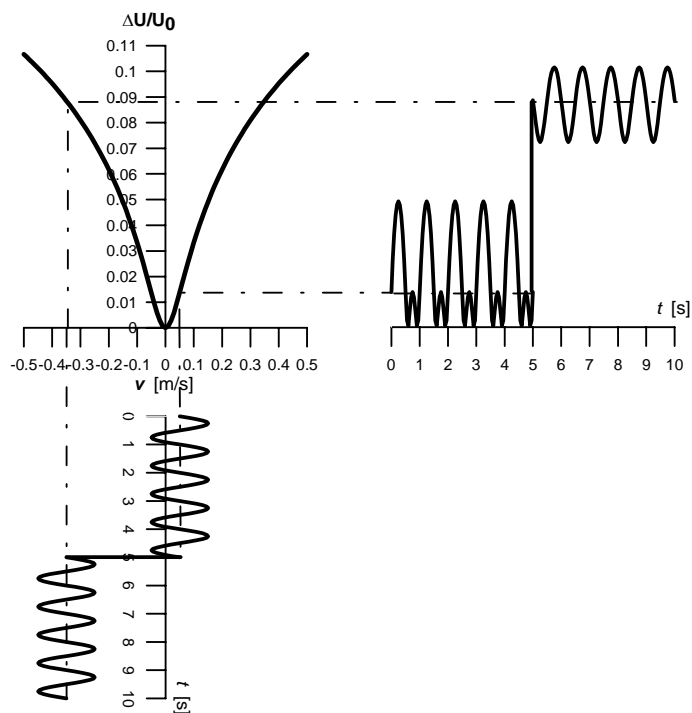
Na Rys. 4 pokazano przebiegi jak na Rys. 3 dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_s + a\omega > v_p > v_s - a\omega$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza.

Na Rys. 5 pokazano przebiegi jak na rysunkach poprzednich dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_p = v_s$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza.

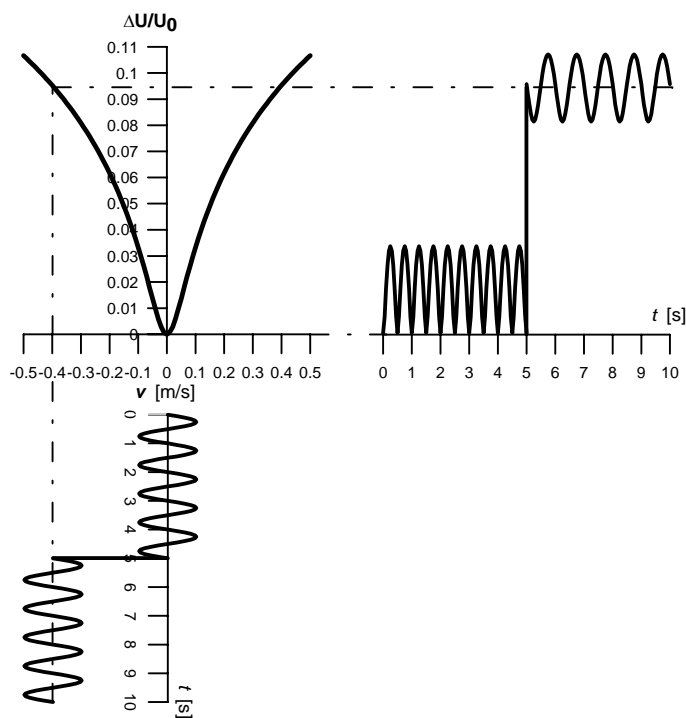
Na Rys. 6 pokazano przebiegi napięcia wyjściowego termooanemometru na wyjściu filtra Bessela 2-go rzędu o częstości granicznej równej częstości ruchu sinusoidalnego dla przypadków z Rys. 3, 4 i 5.



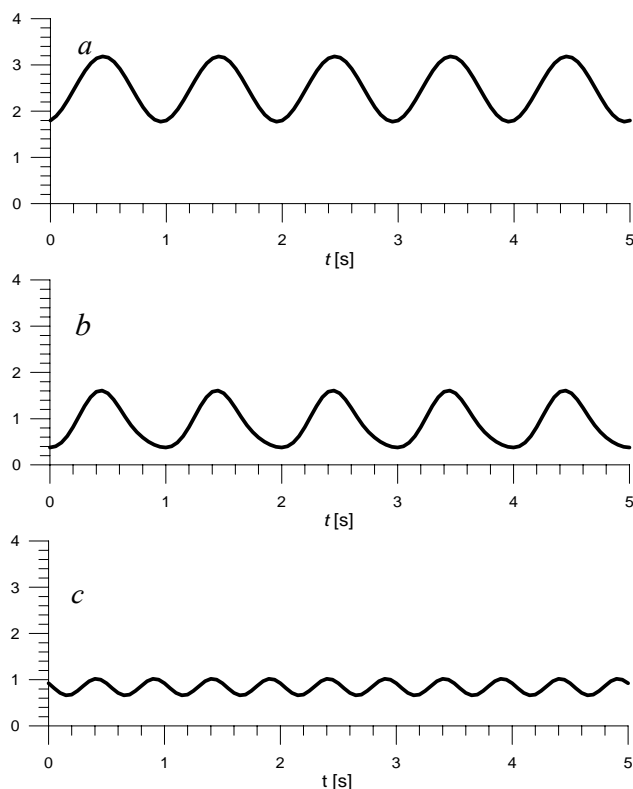
Rys. 3. Przebieg względnej prędkości ruchu sondy, charakterystyka termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego dla prędkości powietrza $v_p = 0$



Rys. 4. Przebieg względnej prędkości ruchu sondy, charakterystyka termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_s - \omega a < v_p < v_s + \omega a$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza



Rys. 5. Przebieg względnej prędkości ruchu sondy, charakterystyka termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_p = v_s$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza



Rys. 6. Przebiegi napięcia wyjściowego termooanemometru na wyjściu filtra dolnoprzepustowego w czasie ruchu sondy zgodnym z ruchem powietrza w tunelu:
a) dla przypadku z Rys. 3, b) dla przypadku z Rys. 4, c) dla przypadku z Rys. 5.

2.2. Metoda minimum

W metodzie tej sonda termooanemometru porusza się naprzemian zgodnie z przepływem powietrza i przeciwnie do przepływu ze stałą prędkością, bez składowej sinusoidalnej. Prędkość powietrza względem prędkości ruchu sondy podaje wzór:

$$v = v_p - v_s$$

gdzie

- v_p – prędkość powietrza,
- v_s – prędkość sondy.

Względną prędkość powietrza wskazuje termooanemometr stałoprądowy. Sygnał z termooanemometru podawany jest na filtr dolnoprzepustowy w celu usunięcia zakłóceń od fluktuacji prędkości powietrza. Przebieg sygnału obserwowany jest na ekranie oscyloskopu. Drogę i prędkość ruchu sondy termooanemometru pokazuje Rys. 2.

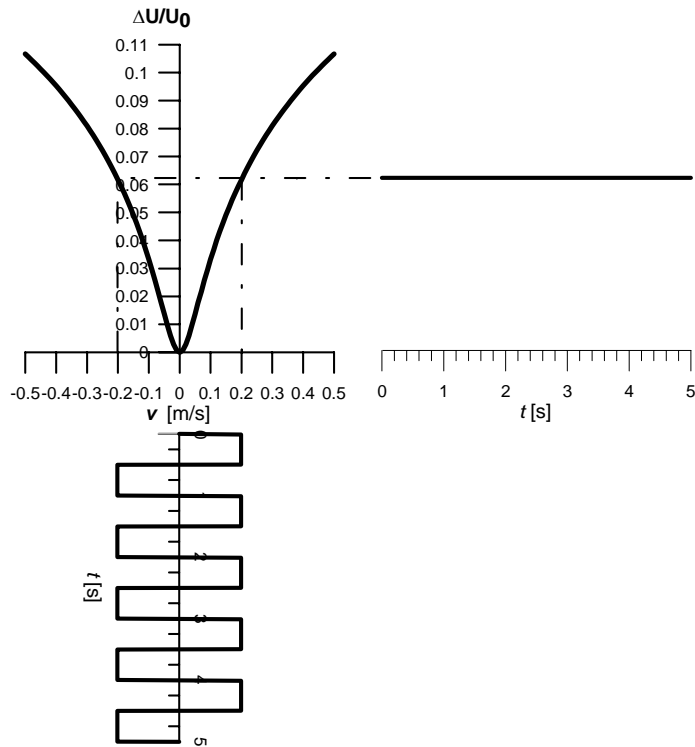
Na Rys. 7 przedstawiono przebieg prędkości względnej sondy termooanemometru (na osi pionowej), charakterystykę termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego z termooanemometru dla prędkości powietrza $v_p = 0$.

Na Rys. 8 pokazano przebiegi jak na Rys. 7 dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_s > v_p > 0$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza.

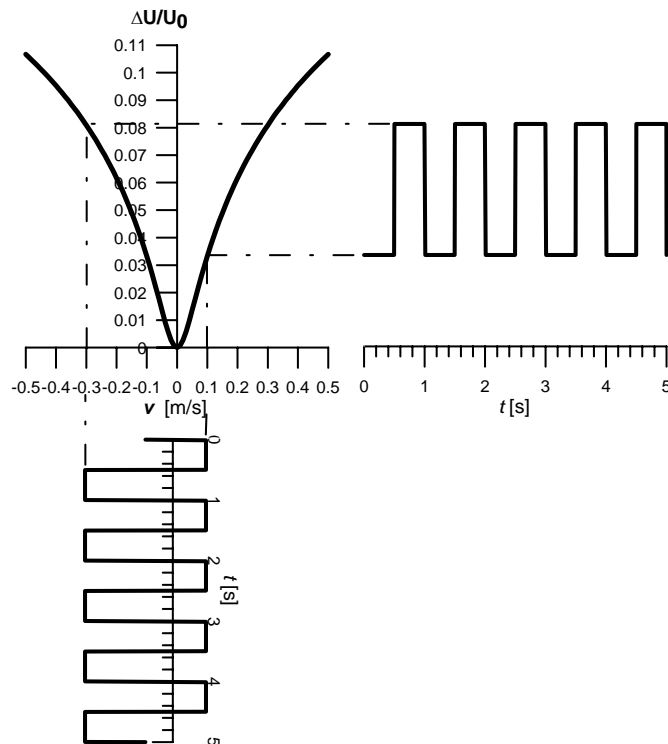
Na Rys. 9 pokazano przebiegi jak na rysunkach poprzednich dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_p = v_s$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza.

Na Rys. 10 pokazano przebiegi jak na rysunkach poprzednich dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_p > v_s$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza.

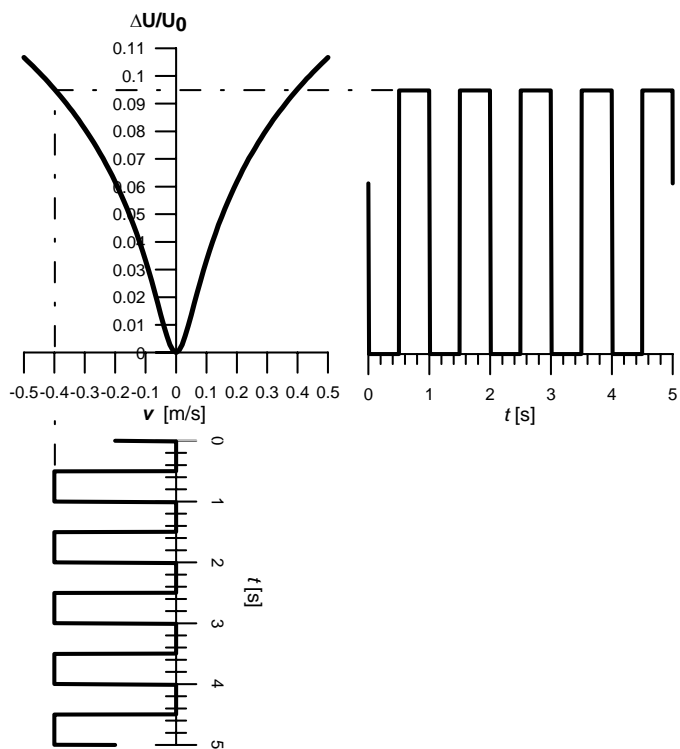
Na Rys. 11 pokazano przebiegi napięcia wyjściowego termooanemometru na wyjściu filtra Bessela 2-go rzędu o częstotliwości granicznej równej częstotliwości ruchu sinusoidalnego w metodzie 2-giej harmonicznej dla przypadków z Rys. 7, 8, 9 i 10.



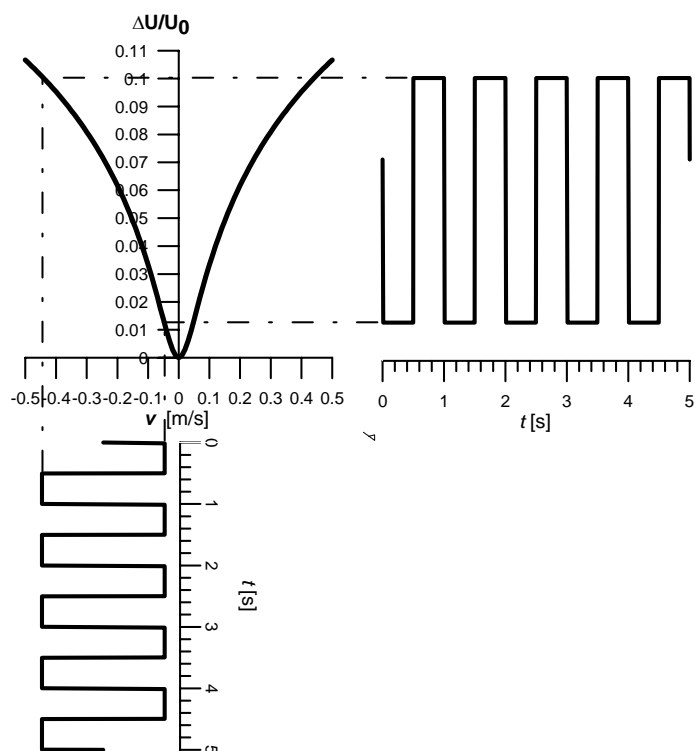
Rys. 7. Przebieg względnej prędkości ruchu sondy, charakterystyka termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego dla prędkości powietrza $v_p = 0$



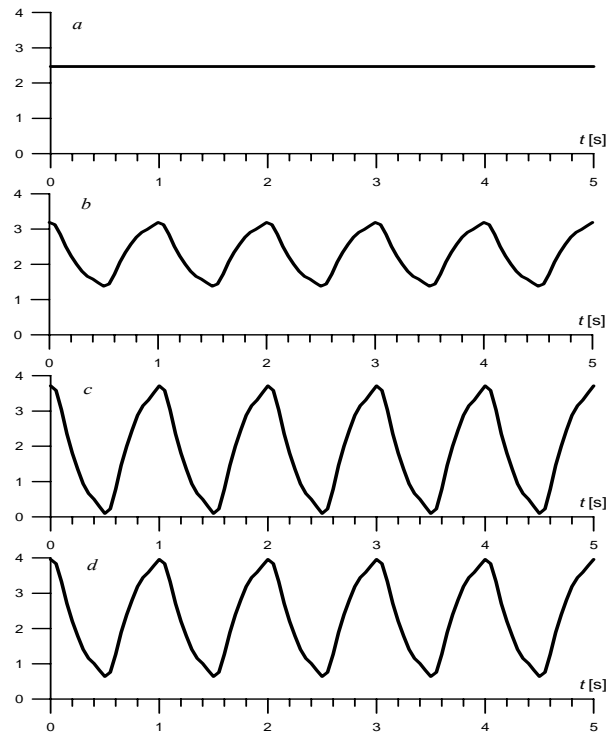
Rys. 8. Przebieg względnej prędkości ruchu sondy, charakterystyka termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego dla prędkości powietrza spełniającej warunek $0 < v_p < v_s$ gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza



Rys. 9. Przebieg względnej prędkości ruchu sondy, charakterystyka termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_p = v_s$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza



Rys. 10. Przebieg względnej prędkości ruchu sondy, charakterystyka termooanemometru i przebieg sygnału wyjściowego dla prędkości powietrza spełniającej warunek $v_p > v_s$, gdy ruch sondy jest zgodny z przepływem powietrza

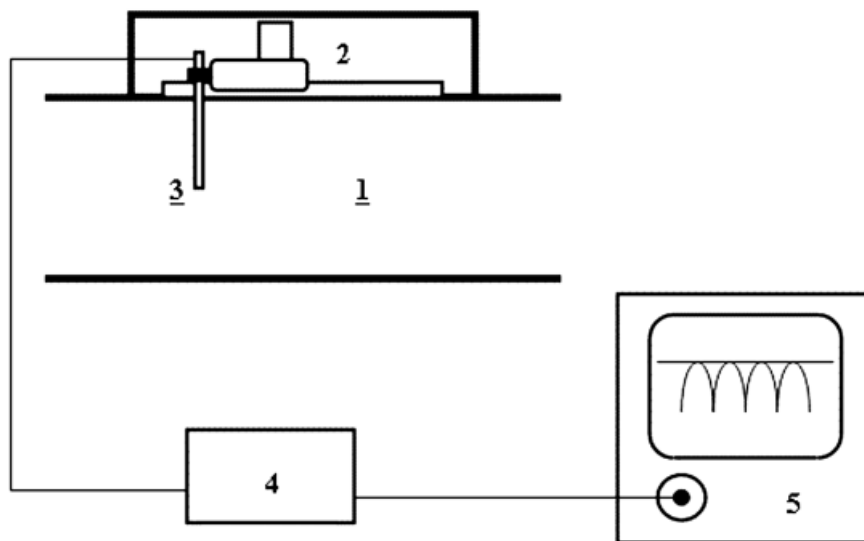


Rys. 11. Przebiegi napięcia wyjściowego termooanemometru na wyjściu filtra dolnoprzepustowego w czasie ruchu sondy zgodnym z ruchem powietrza w tunelu:
 a) dla przypadku z Rys. 7, b) dla przypadku z Rys. 8, c) dla przypadku z Rys. 9, d) dla przypadku z Rys. 10

Jak pokazano na Rys. 10, gdy sonda porusza się z prędkością powietrza dolne wierzchołki w przebiegu na wyjściu filtra dolnoprzepustowego w postaci odkształconej sinusoidy osiągają minimalny poziom, co pokazano na Rys. 11c.

2.3. Stanowisko do wzorcowania układu do pomiaru prędkości powietrza

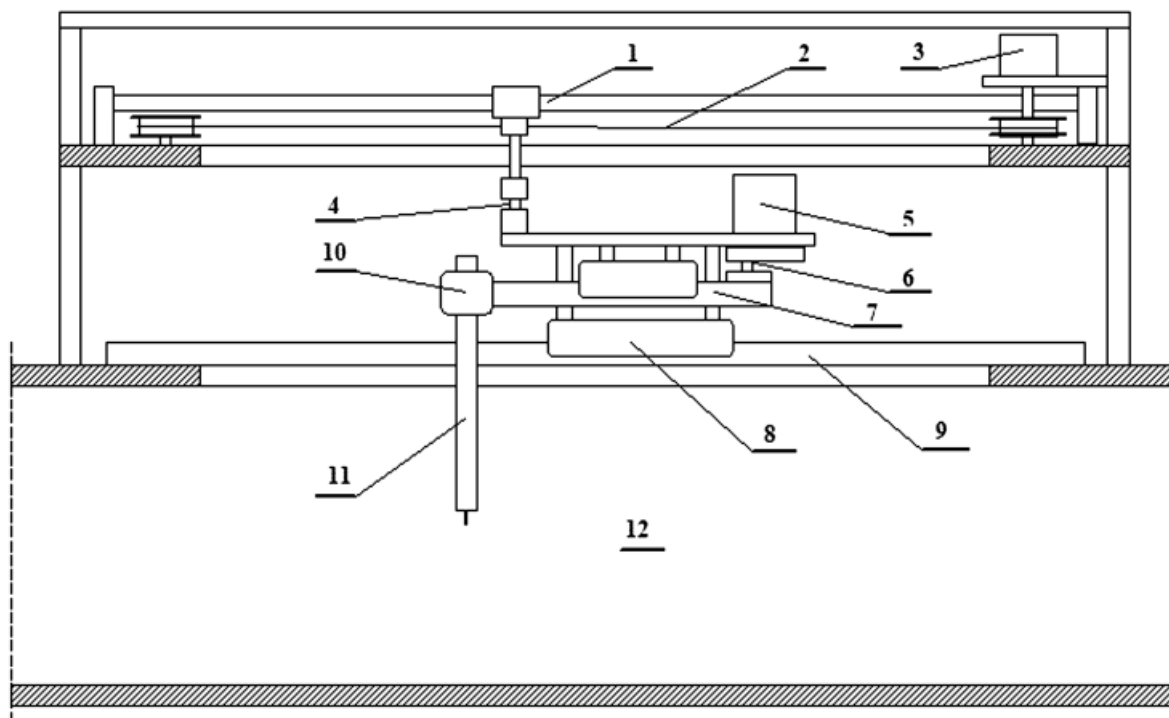
Stanowisko do wzorcowania układu do pomiaru prędkości powietrza w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego TA-1 pokazane jest na Rys. 12.



Rys. 12. Stanowisko do wzorcowania układu do pomiaru prędkości powietrza w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego TA-1

W skład stanowiska wchodzi komora pomiarowa tunelu aerodynamicznego (1), w której następuje pomiar prędkości powietrza, sonda termooanemometru (3), poruszająca się wzdłuż osi komory pomiarowej ze stałą prędkością średnią z dodaną składową okresową (sinusoidalną), mechanizm realizujący ruch sondy (2), termooanemometr (4) i oscyloskop (5) do obserwacji przebiegu sygnału wyjściowego z termooanemometru.

Mechanizm realizujący ruch sondy termooanemometru w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego pokazany jest na Rys. 13.



Rys. 13. Układ ruchu sondy termooanemometru w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego.

- | | |
|---|--|
| 1 – Prowadnica układu napędowego karetki, | 7 – Prowadnica ruchu sinusoidalnego sondy termooanemometrycznej, |
| 2 – Linka pociągowa układu napędowego karetki, | 8 – Wózek prowadnicy karetki, |
| 3 – Silnik krokowy napędu karetki, | 9 – Szyna prowadnicy karetki, |
| 4 – Sprzęgło, | 10 – Uchwyt sondy termooanemometrycznej, |
| 5 – Silnik krokowy napędu ruchu sinusoidalnego sondy termooanemometrycznej, | 11 – Sonda termooanemometru drucikowego, |
| 6 – Urządzenie mimośrodowe, | 12 – Komora pomiarowa tunelu aerodynamicznego |

Układ ruchu sondy termooanemometrycznej (Rys. 13) realizuje ruch karetki ze stałą, zadaną prędkością naprzemiennie zgodnie z ruchem powietrza w tunelu i w kierunku przeciwnym, przy czym sonda termooanemometryczna może poruszać się względem karetki z prędkością sinusoidalnie zmienną o amplitudzie ruchu nie większej niż 0,01 m i częstotliwości regulowanej w granicach 0,1 do 10 Hz. Sonda termooanemometryczna (11), przesuwaną w szczelinie płyty górnej komory pomiarowej (12) tunelu, zamocowana jest w uchwycie (10) na końcu szyny prowadnicy ruchu sinusoidalnego (7). Ruch szyny prowadnicy (7) realizowany jest przez urządzenie mimośrodowe (6) napędzane silnikiem krokowym (5). Wózek prowadnicy (7) przymocowany jest do karetki umieszczonej na wózkach (8) dwóch prowadnic ruchu jednostajnego. Szyny prowadnic położone są równoległe do szczeliny w górnej płycie komory pomiarowej tunelu, po obu jej stronach. Karetka połączona jest z układem napędowym ruchu stałoprędkościowego przez sprzęgło (4). Jako układ napędowy ruchu karetki wykorzystano urządzenie do badania własności dynamicznych anemometrów z programowanym rodzajem (sinusoidalny, trapezowy) i prędkością ruchu, zaprojektowany i wykonany przez J. Kruczkowskiego (1999) pokazane na Fot. 1 i 3. Sprzęgło przymocowane jest do wózka prowadnicy (1) poruszanego przez silnik krokowy (3) za pośrednictwem linki pociągowej (2). Pracę silnika krokowego ruchu sinusoidalnego (5) kontroluje sterownik. Impulsy krokowe do sterownika daje regulowany generator impulsów prostokątnych.

Do pomiaru prędkości ruchu karetki zastosowano enkoder liniowy z głowicą przesuwaną się nad taśmą magnetyczną, zasilany z licznika impulsów. Impulsy z wyjścia głowicy enkodera doprowadzone są do częstotściomierza cyfrowego.

Stanowisko do wzorcowania układu do pomiaru prędkości powietrza umieszczone na komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego pokazano na Fot. 1, a sondę termooanemometryczną przesuwaną się w szczelinie górnej płyty komory pomiarowej pokazuje Fot. 2. Na Fot. 3 pokazano programowany układ sterujący ruchem karetki.



Fot. 1. Stanowisko do wzorcowania układu do pomiaru prędkości powietrza



Fot. 2. Sonda termooanemometryczna w komorze pomiarowej tunelu



Fot. 3. Programowany układ sterujący ruchem karetki

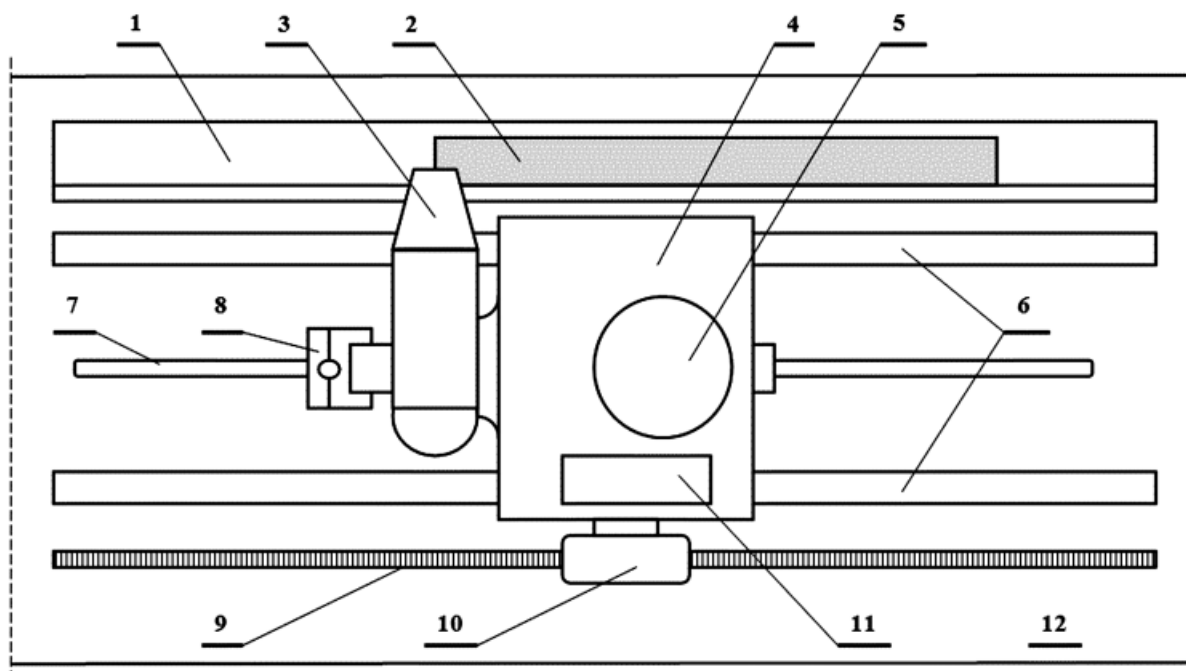
3. Metoda wzorcowania enkodera liniowego

Do wzorcowania enkodera liniowego, składającego się z głowicy przesuwającej się nad taśmą magnetyczną zastosowano płytkę wzorcową o długości nominalnej 0,5 m, mikroskop elektroniczny sprzężony z głowicą, dający obraz krawędzi płytki wzorcowej na ekranie monitora komputera i licznik kwadraturowy zliczający impulsy z głowicy przy przemieszczaniu głowicy od jednej krawędzi płytki wzorcowej do drugiej krawędzi. Mikroskop elektroniczny w połączeniu ze znacznikiem na ekranie monitora pozwala na precyzyjne ustawianie głowicy enkodera na krawędziach płytki wzorcowej. Przesuwając płytkę wzorcową co kilka mm w zakresie ruchu sondy termooanemometrycznej, ograniczonym długością szczeliny w pokrywie komory pomiarowej tunelu i następnie przesuwając głowicę enkodera od jednego do drugiego końca płytki otrzymuje się zbiór liczb impulsów odpowiadających przesunięciu głowicy na drodze 0,5 m. Stąd można obliczyć długość działki enkodera przypadającą na jeden impuls i niepewność tej długości.

Prędkość ruchu karetki mierzona jest przez pomiar częstotliwości impulsów z enkodera liniowego w czasie ruchu karetki ze stałą prędkością w kierunku przepływu powietrza w komorze pomiarowej tunelu.

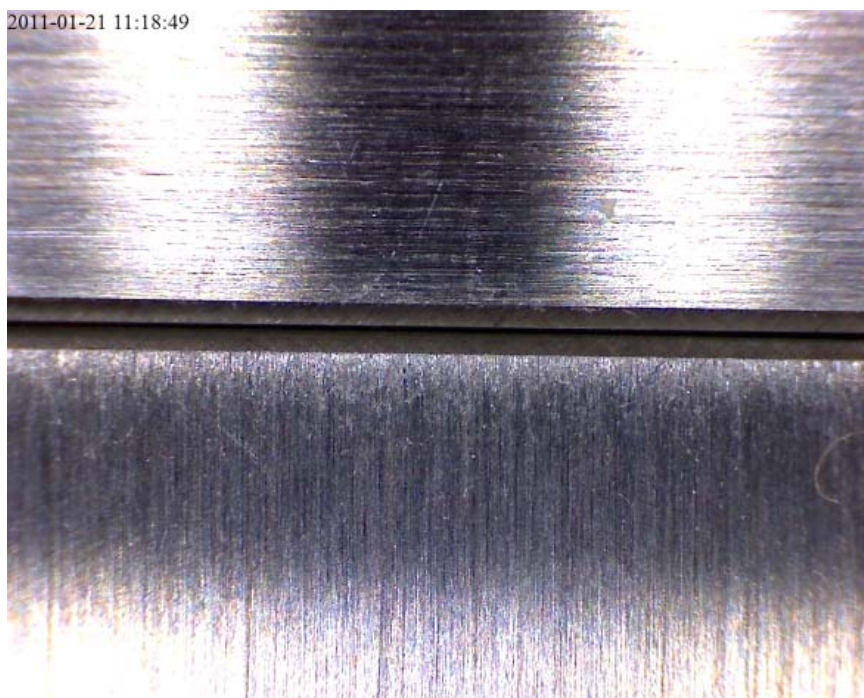
Na Rys. 14 pokazano zestaw do wzorcowania układu do pomiaru prędkości ruchu karetki,

Enkoder liniowy, złożony z głowicy (10) umieszczonej na karetkce i taśmy magnetycznej (9) umieszczonej na pokrywie komory pomiarowej tunelu, przeznaczony do pomiaru prędkości ruchu karetki (4) z sondą termooanemometryczną zamocowaną w uchwycie (8), wzorcowany jest za pomocą płytki wzorcowej klasy 2 o długości znamionowej 0,5 m (2), leżącej w przewodnicy (1) i której końce obserwowane są przez mikroskop elektroniczny (3), umieszczony na karetkce (4), połączony z komputerem przez złącze USB i dający obraz na ekranie monitora komputera. Aby obraz końca płytki był wyraźny i jednoznaczny, do obydwóch końców płytki 0,5 m dosunięto krótkie płytki wzorcowe z tego samego kompletu płytek. Obraz końca płytki wzorcowej na ekranie monitora pokazany jest na Fot. 4.



Rys. 14. Zestaw do wzorcowania układu pomiaru prędkości ruchu karetki

- | | |
|---|--|
| 1 – przewodnica płytki wzorcowej, | 7 – szczelina w pokrywie komory pomiarowej tunelu, |
| 2 – płytka wzorcowa, | 8 – uchwyt sondy termooanemometrycznej, |
| 3 – mikroskop elektroniczny, | 9 – taśma magnetyczna, |
| 4 – karetką, | 10 – głowica enkodera, |
| 5 – silnik krokowy napędu ruchu sinusoidalnego sondy termooanemometrycznej, | 11 – sterownik silnika krokowego, |
| 6 – szyny przewodnic karetki, | 12 – pokrywa komory pomiarowej tunelu aerodynamicznego |



Fot. 4. Obraz końca płytki wzorcowej na ekranie monitora

Głowica enkodera połączona jest z kwadratującym licznikiem impulsów, który zlicza impulsy, generowane przy przesuwaniu głowicy nad taśmą magnetyczną z uwzględnieniem kierunku ruchu.

Na ekranie monitora przytwierdzono nić tak, aby pokryła się z obrazem końca płytki wzorcowej przekazywanym przez mikroskop elektroniczny. Płytkę wzorcową przesuwa się w prowadnicy na początek zakresu ruchu karetki i karetkę ustawia się tak, aby obraz pierwszej krawędzi płytki pokrył się z rozciągniętą na ekranie nicią. Następnie zeruje się licznik impulsów i przesuwa karetkę z mikroskopem tak, aby na ekranie monitora otrzymać obraz drugiego końca płytki wzorcowej pokrywający się z umieszczoną na tym ekranie nicią. Odczytuje się i zapisuje ilość impulsów wskazywaną przez licznik, zeruje się licznik i karetkę z mikroskopem cofa się tak, aby na ekranie monitora obraz pierwszego końca płytki wzorcowej pokrył się z nicią. Odczytuje się i zapisuje stan licznika impulsów, licznik zeruje się, następnie płytkę wzorcową przesuwa się o ok. 5 mm w kierunku końca zakresu ruchu karetki i ponownie ustawia się karetkę z mikroskopem tak, aby obraz krawędzi płytki pokrył się z nicią. Wyżej opisane czynności powtarza się, aż płytka wzorcowa osiągnie koniec zakresu ruchu karetki, określony długością szczeliny (7) w pokrywie komory pomiarowej tunelu (12).

Oblicza się wartość średnią ilości impulsów dla drogi karetki równej długości płytki wzorcowej (N – ilość pomiarów):

$$I = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n$$

Następnie oblicza się niepewność standardową i niepewność rozszerzoną względną pojedynczego pomiaru ilości impulsów w sposób następujący:

Wariancja eksperymentalna	$s^2(i_n) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (i_n - I)^2$
Odchylenie standardowe eksperymentalne	$s(i_n) = \sqrt{s^2(i_n)}$
Niepewność standardowa pojedynczego pomiaru	$u(i) = s(i_n)$
Niepewność standardowa względna pojedynczego pomiaru	$u(i)/I$
Niepewność rozszerzona pojedynczego pomiaru (współczynnik rozszerzenia $k = 2$)	$U(i) = 2 u(i)$
Niepewność rozszerzona względna pojedynczego pomiaru (współczynnik rozszerzenia $k = 2$)	$U(i)/I$

Z normy **PN-EN ISO 3650:2000 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Wzorce długości – Płytki wzorcowe** określa się odchyłkę graniczną te płytek wzorcowych względem długości nominalnej l_n w dowolnym punkcie powierzchni dla klasy 2:

$$te = 0,4 + 0,008l_n \mu\text{m}$$

Przyjmując, że odchyłka graniczna odpowiada połowie długości przedziału objęcia dla poziomu ufności 99 % rozkładu normalnego, otrzymuje się współczynnik rozszerzenia $k = 3$ i niepewność standardową długości płytki:

$$u(D) = te \cdot 10^{-6}/3$$

Długość jednej działki enkodera liniowego oblicza się dzieląc długość płytki wzorcowej przez odpowiadającą jej ilość impulsów:

$$d = D/I$$

Oblicza się niepewność standardową względną działki enkodera

$$\frac{u(d)}{d} = \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2}$$

4. Wzorcowanie

Wzorcowanie kryzy wykonano dla prędkości powietrza 0,1 m/s i 0,25 m/s. Wzorcowanie z komparacją metodą drugiej harmonicznej prowadzi się w następujący sposób:

- Układ sterujący ruchem karetki, pokazany na Fot. 3, programuje się na prędkość ruchu 0.1 m/s i amplitudę ruchu taką, aby punkty zmiany kierunku ruchu były oddalone o około 5 cm od końców szczeliny, w której porusza się sonda termooanemometru. Ruch karetki pokazany jest na Rys. 2.
- Załącza się układ napędowy ruchu karetki i mierzy się częstotliciomierzem częstotliwość impulsów z głowicy enkodera. Wykonuje się serię pomiarów.
- Oblicza się prędkość ruchu karetki i niepewność prędkości
Prędkość ruchu karetki oblicza się z wzoru:

$$v = 4df$$

gdzie

- d – długość działki enkodera,
 f – częstotliwość impulsów z głowicy enkodera.

Mnożnik 4 w powyższym wzorze wynika z faktu, że ilość impulsów z głowicy enkodera zliczana przez licznik kwadraturowy jest 4 razy większa niż ilość impulsów zliczana przez częstotliciomierz. Niepewność standardowa względna prędkości ruchu karetki

$$\frac{u(v)}{v} = \sqrt{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(f)}{f}\right)^2}$$

gdzie

- $d, u(d)$ – długość działki enkodera i niepewność standardowa długości,
 $f, u(f)$ – częstotliwość impulsów z głowicy enkodera i niepewność tej częstotliwości.

- Załącza się napęd ruchu oscylacyjnego sondy termooanemometru
- Zaczynając od prędkości równej 0 zwiększa się prędkość powietrza w tunelu aerodynamicznym aż do zniknięcia harmonicznej o częstotliwości ruchu oscylacyjnego sondy i obecności tylko drugiej harmonicznej w przebiegu obserwowanym na ekranie oscyloskopu w czasie, gdy karetką porusza się zgodnie z przepływem powietrza. Oznacza to, że prędkość powietrza jest równa prędkości ruchu karetki w czasie ruchu zgodnego. Po uzyskaniu tego, wykonuje się pomiar prędkości powietrza układem pomiarowym tunelu. Wykonuje się serię takich pomiarów.
- Oblicza się wartość średnią i niepewność rozszerzoną pojedynczego pomiaru prędkości układem pomiarowym tunelu.
- Wyżej podane kroki powtarza się po zaprogramowaniu prędkości ruchu karetki 2,5 m/s.

Następnie wykonuje się wzorcowanie z komparacją metodą minimum w następujący sposób:

- Układ sterujący ruchem karetki, programuje się na prędkość ruchu 0.1 m/s i długość drogi ruchu karetki około 10 do 15 cm. Układ ruchu oscylacyjnego sondy pozostaje wyłączony.
- Załącza się napęd ruchu karetki.
- Zaczynając od prędkości równej 0 zwiększa się prędkość powietrza w tunelu aerodynamicznym aż do uzyskania minimalnej wysokości położenia na ekranie oscyloskopu dolnych wierzchołków przebieg okresowego w czasie, gdy karetką porusza się zgodnie z przepływem powietrza. Oznacza to, że prędkość powietrza jest równa prędkości ruchu karetki w czasie ruchu zgodnego. Po uzyskaniu tego, wykonuje się pomiar prędkości powietrza układem pomiarowym tunelu. Wykonuje się serię takich pomiarów.
- Oblicza się wartość średnią i niepewność rozszerzoną pojedynczego pomiaru prędkości układem pomiarowym tunelu.
- Wyżej podane kroki powtarza się po zaprogramowaniu prędkości ruchu karetki 2,5 m/s.

5. Wyniki wzorcowania

5.1. Wyniki wzorcowania układu pomiaru prędkości ruchu karetki

Wartość średnia ilości impulsów dla $N = 80$	$I = 99998.1$
Wariancja eksperymentalna	$s^2(i_n) = 50,31899$
Odchylenie standardowe eksperymentalne	$s(i_n) = 7,093588$
Niepewność standardowa pojedynczego pomiaru	$u(i) = s(i_n) = 7,1$
Niepewność standardowa względna pojedynczego pomiaru	$u(i)/I = 7,094 \cdot 10^{-5}$
Niepewność rozszerzona pojedynczego pomiaru (współczynnik rozszerzenia $k = 2$)	$U(i) = 2 u(i) = 14,2$
Niepewność rozszerzona względna pojedynczego pomiaru (współczynnik rozszerzenia $k = 2$)	$U(i)/I = 0,014 \%$
Długość płytki wzorcowej	$D = 0,5 \text{ m}$

Odchyłka graniczna te płytek wzorcowych względem długości nominalnej w dowolnym punkcie powierzchni (PN-EN ISO 3650:2000 *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Wzorce długości – Płytki wzorcowe*)

$$\text{Klasa 2} \quad te = 0,4 + 0,008l_n \mu\text{m} \quad l_n = D [\text{mm}], \quad te = 0,4 + 0,008 \cdot 500 = 4,4 \mu\text{m}$$

Świadectwo wzorcowania nr 261-D/166/133-Obw6-11 z dnia 16 czerwca 2011:

Odchylenie długości środkowej od długości nominalnej	$e_{lc} = +1,38 \mu\text{m}$
Niepewność rozszerzona tego odchylenia	$U = \pm(0,2 + 0,9 \cdot 0,5) = \pm 0,65 \mu\text{m}$ dla wsp. rozszerzenia $k = 2$.

Warunek $|e_{lc}| + \frac{3}{2}|U| \leq te$ jest spełniony.

Niepewność standardowa	$u(D) = te/3 = 4,4 \cdot 10^{-6}/3 = 1,47 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
Niepewność standardowa względna	$u(D)/D = 2,93 \cdot 10^{-6}$

$$\text{Działka: } d = \frac{D}{I} = \frac{0,5}{99998,1} = 5,000095002 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Niepewność standardowa względna działki:

$$\frac{u(d)}{d} = \sqrt{(2,93 \cdot 10^{-6})^2 + (7,064 \cdot 10^{-5})^2} = 7,10 \cdot 10^{-5}$$

Niepewność standardowa działki: $u(d) = 3,55 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

5.2. Wyniki wzorcowania układu do pomiaru prędkości powietrza w tunelu aerodynamicznym TA-1:

Prędkość ruchu karetki:	$v = 4df$
Długość działki:	$d = 5,000095002 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
Niepewność standardowa względna działki	$u(d)/d = 7,10 \cdot 10^{-5}$

5.2.1. Wzorcowanie dla prędkości powietrza 0,1 m/s

Pomiar częstotliwości impulsów z enkodera i niepewność pomiaru częstotliwości:

Ilość pomiarów	$N = 11$
Wartość średnia częstotliwości	$f = 5,0445124 \text{ kHz}$
Wariancja eksperymentalna	$s^2(f_n) = 1,0171022 \cdot 10^{-5} \text{ kHz}^2$
Wariancja eksperymentalna średniej	$s^2(f) = 2,016254733 \cdot 10^{-6} \text{ kHz}^2$
Niepewność standardowa średniej	$u(f) = 0,00142 \text{ kHz}$
Niepewność standardowa względna średniej	$u(f)/f = 2,8145 \cdot 10^{-4}$

Prędkość ruchu karetki i niepewność pomiaru prędkości:

$$\text{Prędkość } v = 4 \cdot 5,000095002 \cdot 10^{-6} \cdot 5,0445124 \cdot 10^3 = 0,100892165 \text{ m/s}$$

$$\text{Niepewność standardowa względna prędkości } u(v)/v = 2,9027 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Niepewność standardowa prędkości } u(v) = 2,9286 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$\text{Niepewność rozszerzona prędkości } U(v) = 5,8572 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

(współczynnik rozszerzenia $k = 2$)

Prędkość ruchu karetki $v_r = 0,100892 \pm 0,000059 \text{ m/s}$

Pomiar prędkości powietrza w tunelu kryzą i niepewność pomiaru:

Metoda pomiaru	1 drugiej harmonicznej	2 minimum
Ilość pomiarów N	14	17
Wartość średnia prędkości	0.1016 m/s	0.1037 m/s
Wariancja eksperymentalna	0.0001526 (m/s) ²	0.0001241 (m/s) ²
Niepewność standardowa pojedynczego pomiaru $u(v_n)$	0.01235 m/s	0.01114 m/s
Niepewność rozszerzona prędkości (współczynnik rozszerzenia $k = 2$) $U(v_n)$	0,02470 m/s	0,02228 m/s
Wynik pomiaru v_k	0.1016 ± 0,0247 m/s	0.1037 ± 0,0223 m/s
Wartość średnia prędkości	0.1027 m/s	
Niepewność rozszerzona prędkości średniej (współczynnik rozszerzenia $k = 2$) $U(v_k)$	0.0175 m/s	

$$\text{Poprawka } \Delta v = v_r - v_k \quad \Delta v = 0,1009 - 0,1027 = -0,0018 \text{ m/s}$$

$$\text{Niepewność poprawki } U(\Delta v) = \sqrt{U^2(v_r) + U^2(v_k)} \quad U(\Delta v) = 0,0175 \text{ m/s}$$

Niepewność pomiaru prędkości $v = 0,1 \text{ m/s}$ w tunelu aerodynamicznym

$$U(v) = U(\Delta v) + |\Delta v| \quad U(0,1) = 0,0175 + 0,0018 = 0,0193 \text{ m/s}$$

$$U(0,1) < 0,05 \text{ m/s}$$

5.2.2. Wzorcowanie dla prędkości powietrza 0,25 m/s

Pomiar częstotliwości impulsów z enkodera i niepewność pomiaru częstotliwości:

$$\text{Wartość średnia z } N = 17 \text{ pomiarów } f = 12.619537 \text{ kHz}$$

$$\text{Wariancja eksperymentalna } s^2(f_n) = 8,2414156 \cdot 10^{-3} \text{ kHz}^2$$

$$\text{Wariancja eksperymentalna średniej } s^2(f) = 4,84789152 \cdot 10^{-4} \text{ kHz}^2$$

$$\text{Niepewność standardowa średniej } u(f) = 0.022017928 \text{ kHz}$$

$$\text{Niepewność standardowa względna średniej } u(f)/f = 1,744749272 \cdot 10^{-3}$$

Prędkość ruchu karetki i niepewność pomiaru prędkości:

$$\text{Prędkość } v = 4 \cdot 5,000095002 \cdot 10^{-6} \cdot 12.619537 \cdot 10^3 = 0,252395535 \text{ m/s}$$

$$\text{Niepewność standardowa względna prędkości } u(v)/v = 1,7462 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Niepewność standardowa prędkości } u(v) = 4,40732 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$\text{Niepewność rozszerzona prędkości } U(v) = 8,81464 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

(współczynnik rozszerzenia $k = 2$)

Prędkość ruchu karetki $v_r = 0,252396 \pm 0,000881 \text{ m/s}$

Pomiar prędkości powietrza w tunelu kryzą i niepewność pomiaru:

Metoda pomiaru	1 drugiej harmonicznej	2 minimum
Ilość pomiarów N	16	15
Wartość średnia prędkości	0.2542 m/s	0.2541 m/s
Wariancja eksperymentalna	0.0001552 (m/s) ²	0,00009398 (m/s) ²
Niepewność standardowa pojedynczego pomiaru $u(v_n)$	0.01246 m/s	0.009694 m/s
Niepewność rozszerzona prędkości (współczynnik rozszerzenia $k = 2$) $U(v_n)$	0,02492 m/s	0,019388 m/s
Wynik pomiaru v_k	0.2542 ± 0,0249 m/s	0.2541 ± 0,0194 m/s
Wartość średnia prędkości	0.2542 m/s	
Niepewność rozszerzona prędkości średniej (współczynnik rozszerzenia $k = 2$) $U(v_k)$	0.0158 m/s	

$$\text{Poprawka} \quad \Delta v = v_r - v_k \quad \Delta v = 0,2524 - 0.2542 = -0,0018 \text{ m/s}$$

$$\text{Niepewność poprawki} \quad U(\Delta v) = \sqrt{U^2(v_r) + U^2(v_k)} \quad U(\Delta v) = 0,0158 \text{ m/s}$$

Niepewność pomiaru prędkości $v = 0,25$ m/s kryzą wielootworową tunelu aerodynamicznego

$$U(v) = U(\Delta v) + |\Delta v| \quad U(0,25) = 0,0158 + 0,0018 = 0,0176 \text{ m/s}$$

$$U(0,25) < 0,05 \text{ m/s}$$

5.3. Spójność pomiarowa

Dla zapewnienia spójności pomiarowej wzorcowania układu do pomiaru prędkości ruchu sondy termomanometru w komorze pomiarowej tunelu wykonano wzorcowania płytki wzorcowej i częstotściomierza w laboratoriach akredytowanych.

5.4. Wyniki wzorcowania

Wartość poprawna prędkości m/s	Wskazanie wzorcowanego układu pomiarowego m/s	Poprawka m/s	Niepewność pomiaru prędkości układem pomiarowym m/s
0,1009	0.1027	-0,0018	0,0193
0,2524	0.2542	-0,0018	0,0176

Wartości bezwzględne poprawek łącznie z ich niepewnością, stanowiące niepewność pomiaru prędkości powietrza układem pomiarowym z kryzą wielootworową są mniejsze niż wartość niepewności pomiaru w/w prędkości powietrza zadeklarowana w procedurze **P/01/03 Procedura wzorcowania anemometrów** z dnia 19.05.2008.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Cierniak W., 1993. *Anemometr stałotemperaturowy, analiza wpływu parametrów mostka i wzmacniacza*, praca doktorska, Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków.
- Kielbasa J., 2010; *Measurement of gas flow velocity: Anemometr with a vibrating hot wire*. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 81, 1.
- Kruczkowski J., 1999: *Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza*. Praca doktorska, IMG PAN Kraków.

Michalski L., Eckersdorf K., 1986. *Pomiary temperatury*. WNT Warszawa.

Oleśkiewicz-Popiel C., Wojtkowiak J., 2007. *Eksperymenty w wymianie ciepła*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.

Trutwin W., Chmiel W., Socha P., 1984. *Cechowanie zwężki pomiarowej 16x50 w tunelu aerodynamicznym*. IMG PAN, Kraków.

Measuring air velocity by means of thermoanemometers under conditions other than calibration conditions

Abstract

The article discusses problems connected with measuring velocity of gases by means of a constant-temperature thermoanemometer, under changing temperatures, humidities, and pressures. It also presents examples of estimations for air velocity measurements.

Keywords: fluid mechanics, thermoanemometry