

Laboratoryjny system do badania charakterystyk kątowych czujników anemometrycznych

PAWEŁ JAMRÓZ, PAWEŁ LIGEZA

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

Streszczenie

Praca przedstawia konstrukcję otwartego tunelu aerodynamicznego zaprojektowanego do badań charakterystyk kierunkowych czujników przepływu w zakresie małych prędkości. Szczególną uwagę zwrócono na proces badań tunelu (wzorcowanie, badanie profilu prędkości oraz intensywności turbulencji).

Słowa kluczowe: wzorcowanie tunelu aerodynamicznego, anemometria, system pomiaru prędkości przepływu

1. Wstęp

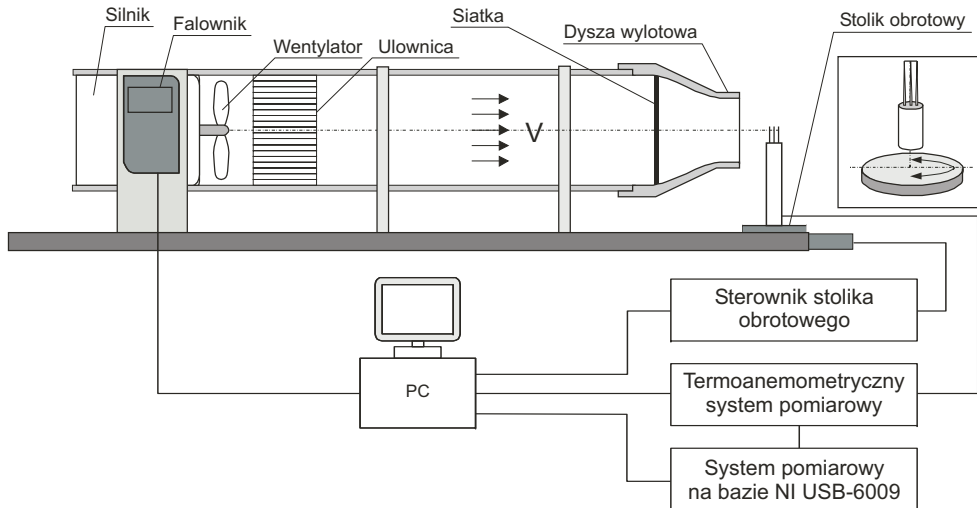
Precyzyjny pomiar chwilowej wartości wektora prędkości przepływu nierozłącznie związany jest z zagadnieniami konstrukcji oraz badań laboratoryjnych stanowisk pomiarowych. Na bazie takich stanowisk składających się z tunelu aerodynamicznego oraz oprzyrządowania wyznaczane zostają charakterystyki kątowe czujników anemometrycznych, których dokładność pomiarowa zależy między innymi od precyzji wykonania tunelu oraz przeprowadzonych badań wzorcujących.

W niniejszym artykule zostanie przedstawiony proces budowy stanowiska pomiarowego do badania charakterystyk kątowych czujników anemometrycznych oraz badania wzorcujące mające na celu określenie chwilowej wartości prędkości przepływu na wylocie tunelu aerodynamicznego. Opisane zostanie również wyznaczanie użytecznego obszaru pomiarowego (badanie profili tunelu) oraz określenie intensywności turbulencji w strefie pomiarowej.

2. Budowa systemu

Omawiany tunel aerodynamiczny przedstawiony na rysunku 1 został skonstruowany do badań charakterystyk kierunkowych czujników prędkości w zakresie małych i średnich prędkości, tj. do ok. 17 m/s. Wymiary geometryczne tunelu wynoszą odpowiednio: długość 1,5 m, średnica dyszy wylotowej 110 mm.

W skład stanowiska wchodzi: otwarty tunel aerodynamiczny z wentylatorem napędzany silnikiem trójfazowym zasilanym prądem o częstotliwości w zakresie od 0,5 do 50 Hz z rozdzielczością 0,1 Hz z falownika HITACHI SJ200 (rysunek 2). Dodatkowo stanowisko wyposażone jest w termoanemometryczny system pomiarowy (rysunek 3) pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stałotemperaturowego [3], stolik z silnikiem krokowym do regulacji położenia czujnika pomiarowego (rysunek 4), system pomiarowy zbudowany na bazie wielofunkcyjnej karty do akwizycji danych NI USB-6009 (rysunek 5). Całość nadzorowana jest przez program kontrolno pomiarowy wykonany w środowisku DELPHI, za pomocą którego dokonywane jest sterowanie układem oraz akwizycja i wizualizacja danych pomiarowych.

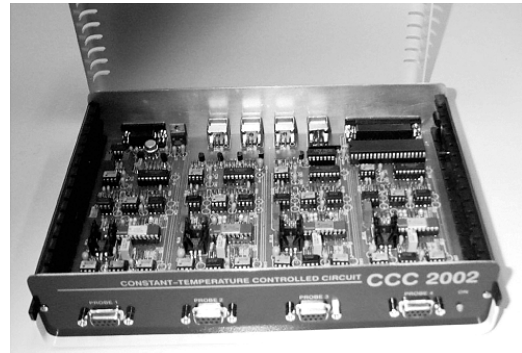


Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do wyznaczania charakterystyk kątowych czujników anemometrycznych



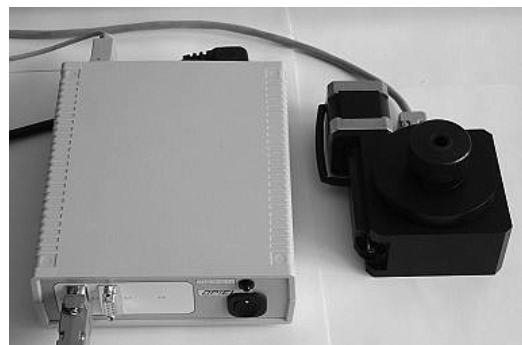
Rys. 2. Falownik Hitachi SJ200: Klasa zasilania 200 V
Znamionowe napięcie zasilania: 200 do 240 V $\pm 10\%$, 50/60 Hz $\pm 5\%$,
Wektorowe sterowanie z wykorzystaniem interfejsu RS485 obsługującego komunikację sieciową wg protokołu Modbus RTU

Rys. 3. Termooanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stałotemperaturowego
4 kanały pomiarowe, rezystancja czujnika 0-20 Ω , zadawanie i pomiar rezystancji czujnika z rozdzielczością 12 bitów, częstotliwość graniczna dla pomiaru prędkości do 100 kHz



Rys. 4. Wielofunkcyjny moduł pomiarowy NI USB-6009
8 wejść analogowych w konfiguracji SE lub 4 wejścia w konfiguracji DI, 14/13 bitowy przetwornik A/D SE/DI, zakres wejściowy ± 20 V, próbkowanie z częstotliwością 48/42 kHz, dwa 12 bitowe wyjścia analogowe pracujące z częstotliwością do 150 S/s

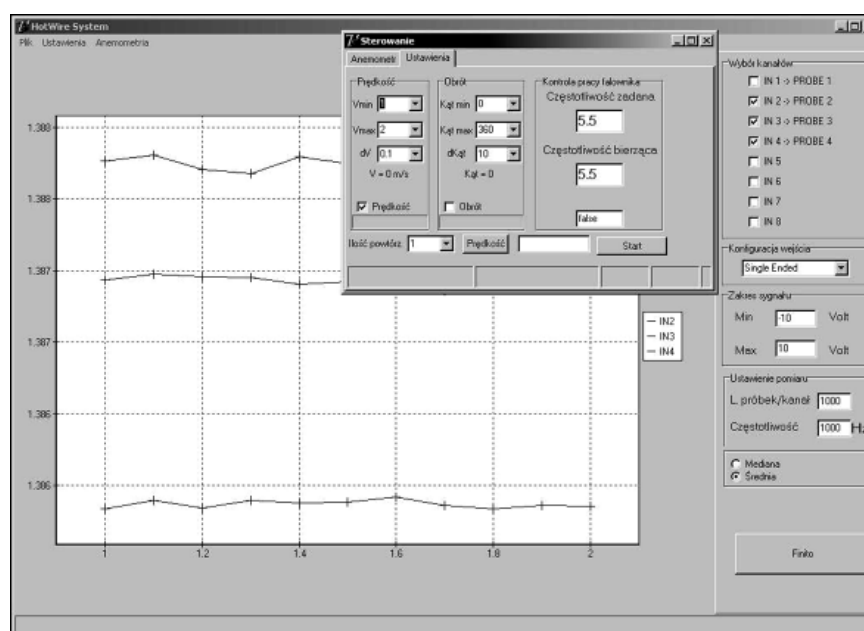
Rys. 5. Układ pozycjonowania czujnika wraz z układem sterowania Optel 040
Silnik z krokiem 1,8° (z przełożeniem 50 kroków na 1°)
Sterownik silnika komunikujący się z komputerem za pomocą interfejsu RS-232



3. Oprogramowanie

Główny interfejs programu zarządzającego pracą systemu przedstawiony został na rysunku 6. Umożliwia on:

- zadawanie prędkości przepływu – sterowanie falownikiem,
- regulacja kątem obrotu czujnika,
- sterowanie wielofunkcyjną kartą pomiarową NI USB 6009: akwizycja danych pomiarowych – wejścia analogowe, sterowanie układem termooanemometrycznym – wyjścia cyfrowe),
- sterowanie termooanemometrycznym systemem pomiarowym (zadawanie poziomu nagrzania czujnika oraz pomiar rezystancji czujnika w kanałach 1-4, wybór trybu pracy torów pomiarowych – stałoprądowy termometr rezystancyjny lub termooanemometr stałotemperaturowy),
- zapisywanie oraz wizualizacja danych pomiarowych.



Rys. 6. Interfejs programu zarządzającego stanowiskiem pomiarowym

Zarówno falownik jak i układ pozycjonowania czujnika sterowane są poprzez szeregowe łącze RS. Sama transmisja danych do i z falownika wykorzystuje dodatkowo protokół komunikacyjny MODBUS. Wielozadaniowa karta NI USB 6009 pełni rolę urządzenia za pomocą którego dokonywana jest akwizycja danych pomiarowych jak i również umożliwia sterowanie pracą termooanemometrycznego systemu pomiarowego (pierwotnie przystosowanego do sterowania za pomocą interfejsu CENTRONICS).

4. Wzorcowanie tunelu

Ważnym etapem prac konstrukcyjnych było przeprowadzenie wzorcowania oraz wyznaczenia parametrów tunelu polegające na określeniu profilu prędkości w obszarze pomiarowym, na końcu dyszy wylotowej oraz zmierzeniu intensywności turbulencji [4].

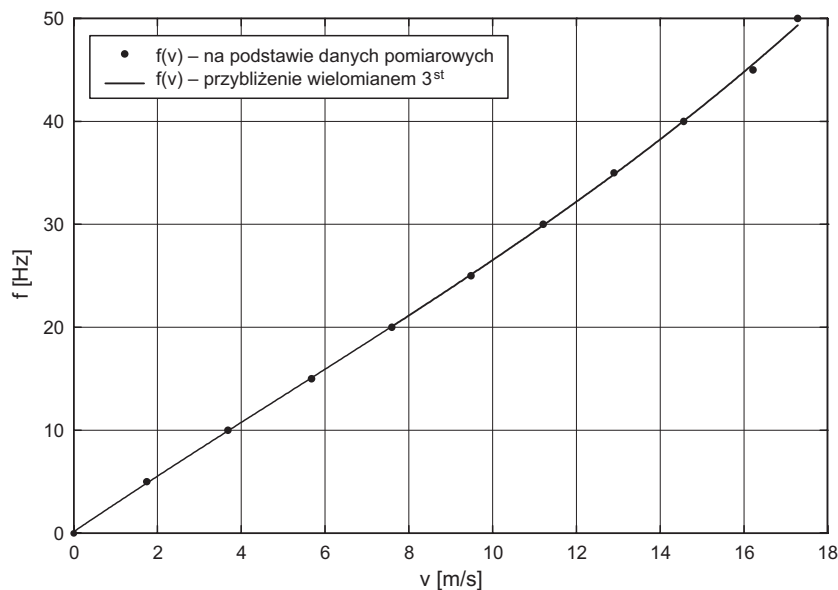
Wzorcowanie przeprowadzono w oparciu o metodę ciśnieniową. W tym celu wykorzystano rurkę Prandtla o średnicy 3 mm oraz manometr Betz. Dzięki zastosowaniu tych przyrządów otrzymano wprost ciśnienie dynamiczne przepływającego czynnika dla różnych częstotliwości prądu zasilającego silnik wentylatora w zakresie od 0 do 50 Hz z krokiem 5 Hz. Następnie w oparciu wyznaczono prędkości przepływu dla wcześniej określonych częstotliwości z uwzględnieniem temperatury strugi przepływającego powietrza (23°C), wilgotności (34%) oraz lokalnego ciśnienia atmosferycznego (980 hPa) na podstawie zależności (1):

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot P_D}{\rho}} \quad (1)$$

gdzie:

- v – prędkość przepływu w części pomiarowej tunelu,
- P_D – ciśnienie dynamiczne zmierzone jako różnica ciśnień całkowitego i statycznego,
- ρ – gęstość czynnika przepływającego.

Przekształcając zależność określającą wpływ zmian częstotliwości na prędkość przepływu na zależność odwrotną oraz dokonując aproksymacji wielomianem trzeciego stopnia uzyskano charakterystykę tunelu (rys. 7). Na podstawie zależności opisującej tę krzywą dla zadanej prędkości przepływu dobierana jest częstotliwość prądu zasilającego silnik wentylatora.



Rys. 7. Wzorcowanie tunelu aerodynamicznego

Kolejnym etapem badań tunelu było wyznaczenie użytecznego obszaru pomiarowego, w którym profile prędkości będą możliwe płaskie oraz dokonanie pomiaru intensywności turbulencji.

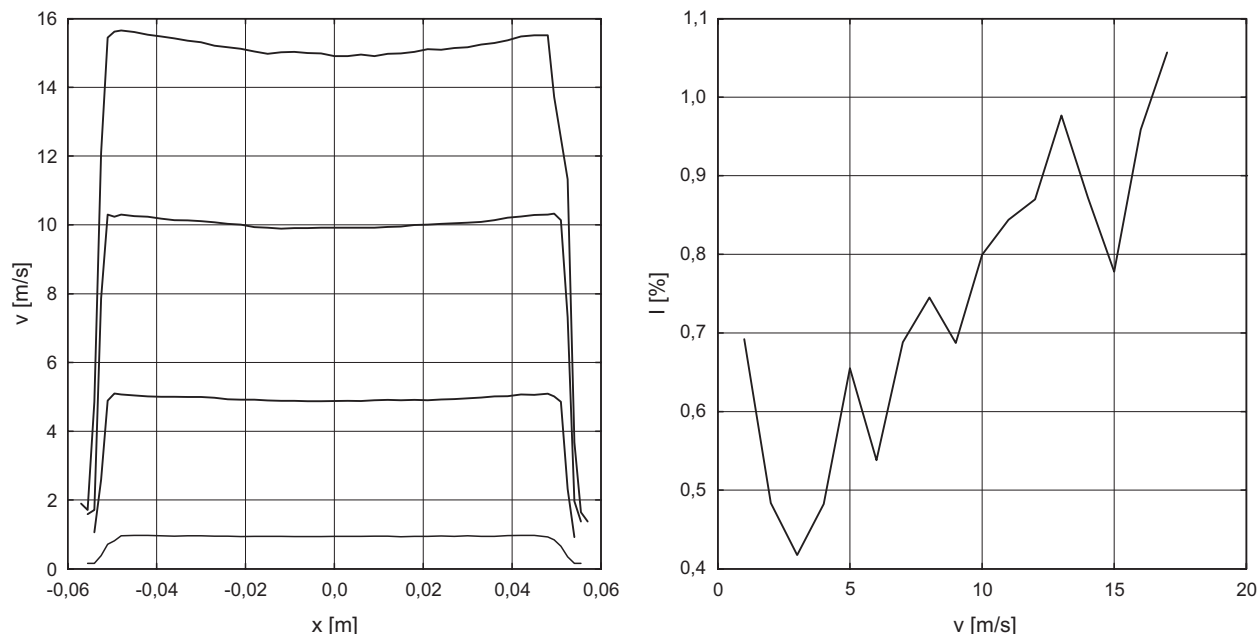
Wyznaczając profile dokonywano pomiarów prędkości strugi przepływającego powietrza w części pomiarowej w zakresie od -57 do 57 mm od osi tunelu. Badania wykonano dla czterech różnych prędkości przepływającej strugi tj. dla 1 , 5 , 10 i 15 [m/s] przy użyciu zestawu termooanemometrycznego składającego się z sondy pomiarowej z włóknem wolframowym oraz anemometru stałotemperaturowego HPA 98. Czujnik pomiarowy został wcześniej wywzorcowany, wyznaczone zostały jego parametry umożliwiające wyznaczenie bieżącej prędkości przepływu zgodnie z prawem Kinga [5]. Pomiary zostały dokonane przy temperaturze wynoszącej $24 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Wyniki badań zestawiono na Rysunku 3a.

Badania intensywności turbulencji [1] zostały wykonane dla prędkości z zakresu 1 - 17 m/s z krokiem 1 m/s, przy użyciu tego samego zestawu termooanemometrycznego jak w przypadku badań profili prędkości. Dla każdej z prędkości przy użyciu systemu pomiarowego rejestrowano 10 tysięcy próbek wartości chwilowej prędkości v_i z częstotliwością 5 kHz, z których następnie wyznaczono procentową wartość intensywności turbulencji zgodnie ze wzorem (2):

$$I = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}{N}}}{\bar{v}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

- v_i – zarejestrowane chwilowe wartości prędkości,
- N – liczba zarejestrowanych wartości prędkości v_i ,
- \bar{v} – wartość średniej prędkości.



Rys. 8. a – wykres profili prędkości, b – charakterystyka intensywności turbulencji

Na bazie wyznaczonych profili prędkości (rys. 8a) można zaobserwować przedziały, które dają użyteczny obszar pomiarowy wokół osi tunelu. Przedziały te obejmują zakres od -20 do 20 mm, gdzie przepływająca struga powietrza cechuje się stałością prędkości.

Wyniki pomiarów intensywności turbulencji (rys. 8b) wykazały wzrost procentowej wartości intensywności turbulencji wraz ze wzrostem prędkości przepływu. Maksymalna wartość współczynnika I wynosi $1,057\%$ dla prędkości 17 m/s. Dla zakresu prędkości do 10 m/s wartość wskaźnika nie przekracza $0,8\%$.

5. Podsumowanie

Przedstawiony tunel aerodynamiczny stanowi podstawowy element stanowiska do badań charakterystyk kątowych czujników termooanemometrycznych. Z jego wykorzystaniem przeprowadzane będą badania nowych konstrukcji czujników pomiarowych oraz testowane zostaną nowe techniki pomiarów prędkości przepływów.

6. Literatura

- [1] Elsner J., Drobniak W.: *Metrologia turbulencji przepływów*, Ossolineum, Wrocław, 1995.
- [2] Jamróz P. Ligęza P.: *Stanowisko do badań charakterystyk kierunkowych czujników przepływu w zakresie małych prędkości*, Materiały IX Konferencji Naukowej Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE 2006.
- [3] Ligęza P.: *Sterowany komputerowo termooanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stalotemperaturowego*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 5, nr 2, (2003) s. 237-244.
- [4] Ligęza P.: *Układy termooanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*, Rozprawy Monografie, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2001.
- [5] Ligęza P.: *Zamknięty tunel aerodynamiczny z regulowaną temperaturą*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 2002.

Mobile Data Acquisition system with use the NI USB-6009**Abstract**

The article presents the construction of open wind tunnel. This tunnel was constructed to hot-wire probes angular calibration. The velocity range in the tunnel is low and it is up to 17 m/s. Presented paper describe researches of the tunnel calibration and tunnel parameters especially.

Keywords: calibration of wind tunnel, hot-wire anemometry, velocity measurement system

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Stanisław Gumuła*, AGH