

Aplikacja wspomagająca pomiary termoanemometryczne

KATARZYNA SOCHA, PAWEŁ LIGĘZA

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono oprogramowanie do pomiarów termoanemometrycznych. Umożliwia ono sterowanie stanowiskiem pomiarowym oraz akwizycję i wizualizację danych pomiarowych. Zostały w nim zaimplementowane algorytmy pomiaru za pomocą klasycznej sondy jedno-, dwu- i trójwłóknowej oraz sondy z tzw. włóknem dzielonym do wykrywania zwrotu. Program umożliwia zautomatyzowanie pomiarów, dzięki czemu łatwiejsze jest testowanie nowych metod pomiarowych.

Słowa kluczowe: termoanemometria, akwizycja i wizualizacja danych pomiarowych, algorytm pomiarowy

1. Wstęp

Testowanie nowych metod badawczych z dziedziny termoanemometrii wymaga odpowiednio oprogramowanego stanowiska laboratoryjnego. Oprogramowanie takie powinno umożliwiać sterowanie poszczególnymi elementami stanowiska oraz akwizycję danych pomiarowych. Dzięki temu można w pełni zautomatyzować przeprowadzany eksperyment.

W prezentowanym oprogramowaniu *anemoPomiar* można wyróżnić procedury służące do ustalenia warunków eksperymentów, czyli pozycjonowanie sondy pomiarowej, ustalenie parametrów przepływu oraz procedury związane z wykonaniem samego pomiaru (konfiguracja parametrów karty pomiarowej oraz układu stałotemperaturowego).

Aplikacja posiada wygodny interfejs umożliwiający wprowadzanie parametrów eksperymentu, wizualizację danych pomiarowych oraz śledzenie ewentualnych błędów w wykonywanym pomiarze. Wszystkie dane pomiarowe są automatycznie zapisywane do pliku tekstowego o nazwie wybranej przez użytkownika. Również parametry eksperymentu mogą zostać zapisane do pliku w celu ich późniejszego odtworzenia.

W programie zaimplementowano dwie metody pomiarowe: pomiar składowych wektora prędkości oraz pomiar wektora prędkości z uwzględnieniem zwrotu. W miarę opracowywania nowych metod badawczych program będzie rozbudowywany o nowe algorytmy.

2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko badawcze do pomiarów z dziedziny metrologii przepływów składa się z tunelu aerodynamicznego, układu pozycjonowania sondy (rotor), sterowanego układu stałotemperaturowego (CCC2002), zewnętrznej karty pomiarowej oraz komputera ze specjalistycznym oprogramowaniem.

Tunel aerodynamiczny sterowany jest za pomocą falownika SJ200 firmy HITACHI. Silnik zasilany jest prądem zmiennym o częstotliwości od 0,5 do 50 Hz z rozdzielczością 0,1 Hz (Jamróz i Ligęza, 2006). Maksymalna osiągalna prędkość w tunelu wynosi 17 m/s.

Do pozycjonowania sondy względem osi tunelu służy rotor. Umożliwia on obrót sondy wokół osi obsadki w płaszczyźnie prostopadłej do osi tunelu. Rozdzielczość obrotu wynosi 0,036°.

Akwizycja danych pomiarowych wykonywana jest za pomocą karty pomiarowej firmy National Instruments NI USB-6009. Jest to zewnętrzna, uniwersalna karta pomiarowa z interfejsem USB. Karta ta zawiera

8 wejść analogowych, które można skonfigurować do pracy jako 8 kanałów w trybie niesymetrycznym (ang. *Single Ended* – SE) lub 4 kanały w trybie różnicowym (ang. *Differential* – DI). W trybie SE zakres pomiarowy wynosi ± 10 V, natomiast w trybie DI zakres pomiarowy może być zmieniany: ± 1 V, $\pm 1,25$ V, ± 2 V, $\pm 2,5$ V, ± 4 V, ± 5 V, ± 10 V, ± 20 V. Teoretyczna maksymalna częstotliwość próbkowania w trybie jednokanałowym wynosi 48 kHz. Natomiast w trybie wielokanałowym wynosi ona 42 kHz (Manual USB-6009).

W przedstawionym systemie pomiarowym wykorzystano czterokanałowy sterowany cyfrowo, stałotemperaturowy układ zasilania czujników anemometrycznych CCC2002. Stanowi on alternatywę dla układów mostkowych i umożliwia prace zarówno w układzie stałotemperaturowym (pomiar prędkości), jak i stałoprądowym (pomiar temperatury). Układ stałotemperaturowy CCC2002 ma również możliwość generacji testu częstotliwościowego. Polega on na wygenerowaniu fali prostokątnej we wszystkich kanałach jednocześnie i służy do regulacji parametrów dynamicznych układu (Ligęza i Socha, 2005).

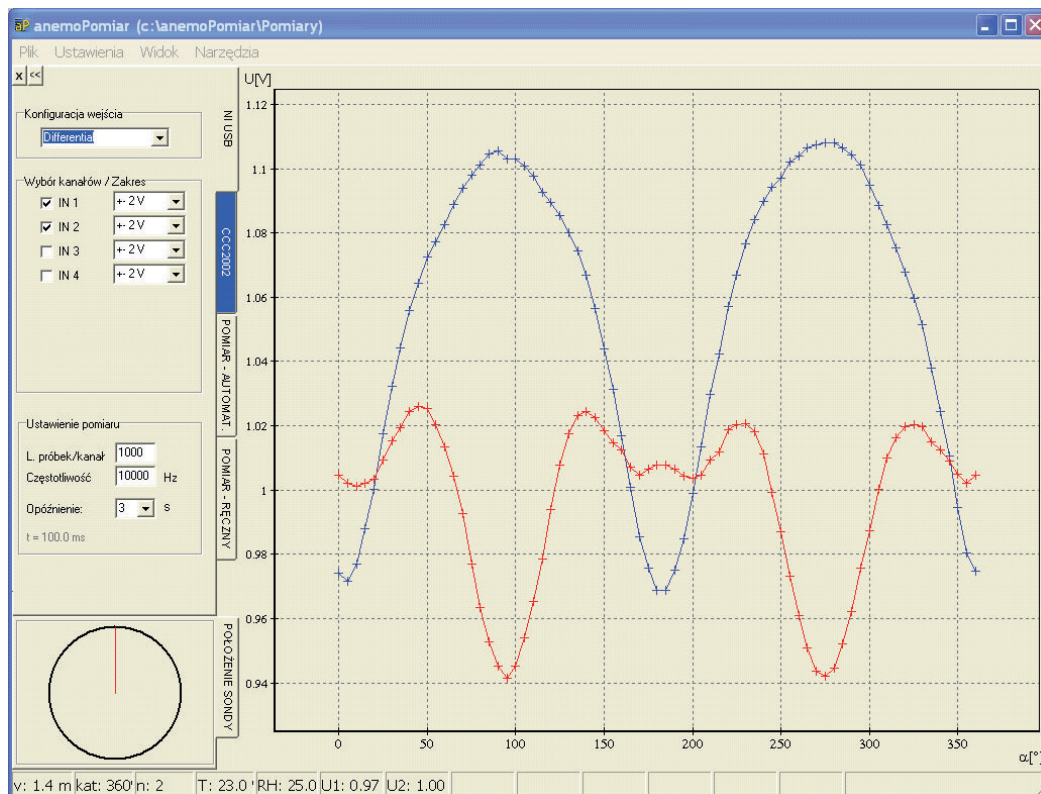
Programowanie układu CCC2002 może polegać na (Ligęza, 2003):

- ustaleniu dla wybranych kanałów trybu pracy jako stałoprądowy termometr rezystancyjny lub stałotemperaturowy termoanemometr,
- programowym pomiarze rezystancji czujników w poszczególnych kanałach,
- zadaniu poziomu nagrzania czujnika w wybranych kanałach,
- włączeniu testu częstotliwościowego termoanemometrów we wszystkich kanałach jednocześnie.

3. Oprogramowanie

Stanowisko pomiarowe sterowane jest za pomocą komputera ze specjalistycznym oprogramowaniem *anemoPomiar*. Program powstał w środowisku Delphi i wykorzystuje wcześniej napisane procedury: do sterowania pracą układu stałotemperaturowego (Ciombor, 2004; Gawor i Socha, 2004), do ustawiania parametrów karty pomiarowej, częstotliwości falownika oraz układu pozycjonowania czujnika (Jamróz i Ligęza, 2006). Program umożliwia również akwizycje i wizualizacje danych pomiarowych. Dzięki temu możliwe jest zautomatyzowanie eksperymentów pomiarowych wykonywanych na stanowisku.

Interfejs użytkownika składa się z czterech głównych części (rys. 1): *Menu głównego*, dwóch paneli oraz paska stanu umieszczonego na dole ekranu. Panel boczny, znajdujący się po lewej stronie, służy do



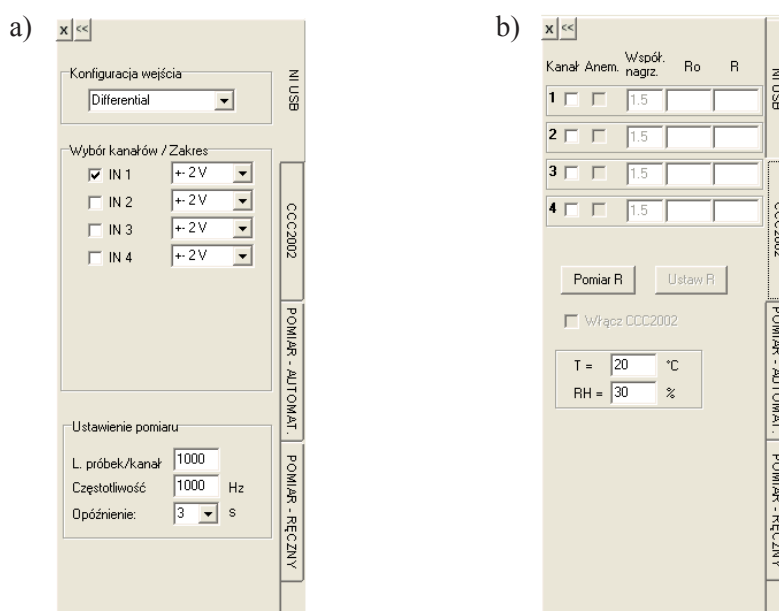
Rys. 1. Interfejs programu

ustawienia parametrów eksperymentu. Dwie pierwsze zakładki dotyczą ustawienia parametrów pracy karty pomiarowej oraz sterowanego układu stałotemperaturowego. Kolejne dwie zakładki dotyczą wykonania eksperymentu: ustawienia prędkości oraz położenia sondy. U dołu panelu znajduje się pole, w którym rysowane jest aktualne położenie kątowe sondy. Drugi panel służy do wizualizacji danych pomiarowych. W celu łatwiejszego obserwowania pojawiających się na ekranie przebiegów panel boczny można zwinąć lub zupełnie schować. Na pasku stanu prezentowane są aktualne wartości: prędkości, położenia sondy względem położenia początkowego, temperatury, wilgotności oraz napięć zmierzonych w poszczególnych kanałach karty pomiarowej.

Po uruchomieniu programu pojawia się okno umożliwiające wybranie katalogu, w którym będą zapisywane dane pomiarowe oraz parametry eksperymentu. Istnieje również możliwość utworzenia nowego katalogu. Opcja ta służy do odpowiedniego segregowania danych pomiarowych i ustawień parametrów z poszczególnych eksperymentów.

3.1. Konfiguracja parametrów karty pomiarowej

Ustawienie parametrów pracy karty pomiarowej NI USB 6009 (rys. 2a) polega na: wyborze konfiguracji wejść analogowych (*Differential/Single Ended*), wyborze aktywnych kanałów, ustaleniu dla nich zakresu napięciowego, określeniu częstotliwości próbkowania oraz liczby uśrednianych próbek. W zależności od wybranego trybu pracy wejść zmienia się liczba dostępnych do wyboru kanałów oraz dopuszczalny zakres pomiarowy. W przypadku trybu *Single Ended* pojawia się 8 kanałów bez możliwości zmienienia zakresu pomiarowego na inny niż $\pm 10V$. Natomiast dla trybu *Differential* dostępne są tylko cztery pierwsze kanały, a zakres pomiarowy można ustalić zgodnie z dopuszczalnym dla karty. Program posiada zabezpieczenie przed wpisaniem zbyt dużej częstotliwości próbkowania. W takim wypadku automatycznie do pola „Częstotliwość” wpisywana jest maksymalna dopuszczalna wartość w zależności od wybranej liczby kanałów.



Rys. 2. Panele a) do ustawiania parametrów pracy karty pomiarowej oraz b) do konfiguracji parametrów pracy czujnika

W programie *anemoPomiar* istnieje możliwość zapisania ustawionych parametrów karty w pliku o rozszerzeniu `*.par` za pomocą dostępnej opcji w „Menu Ustawienia – Zapisz ustawienia”, a także możliwość ich ponownego wczytania do programu – „Menu Ustawienia – Wczytaj ustawienia”.

3.2. Konfiguracja parametrów pracy czujnika

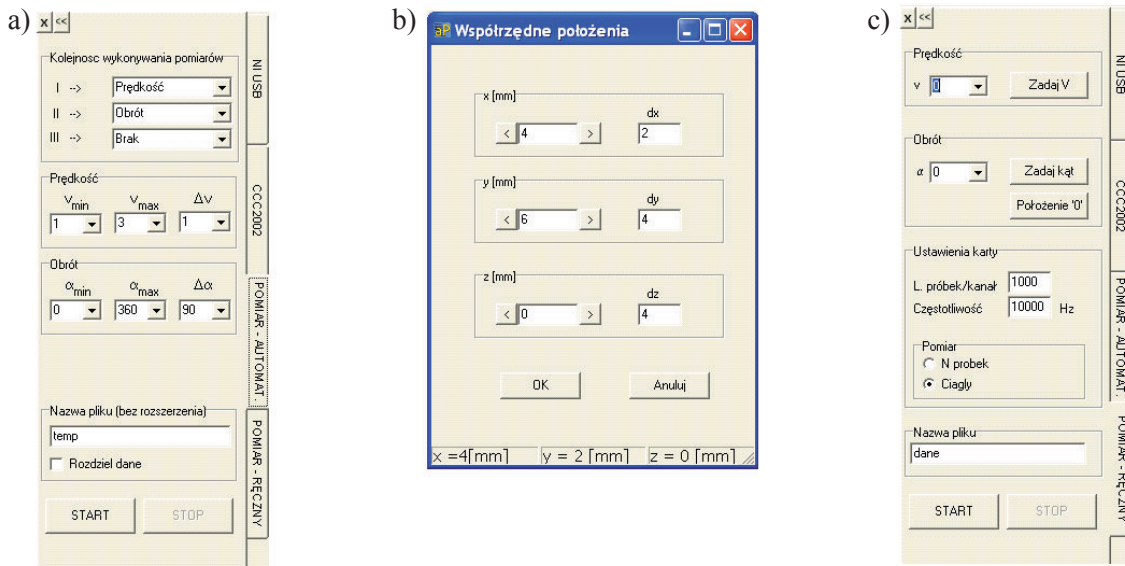
Sterowanie pracą układu stałotemperaturowego (rys. 2b) polega na wyborze aktywnych kanałów i ustawieniu ich w odpowiednim trybie pracy (anemometr lub termometr). Następnie należy wykonać po-

miar rezystancji włókien R_0 („Pomiar R ”). Na podstawie zmierzonej rezystancji oraz wartości zadanego współczynnika nagrzania (w) obliczana jest rezystancja pracy ($R = R_0 w$) dla kanałów pracujących jako anemometry. Wyznaczona rezystancja pracy zostaje zaakceptowana przez użytkownika i wprowadzona do układu po przyciśnięciu przycisku „Ustaw R ”. Jeżeli rezystancja pracy jest zbyt duża (obecnie $R_{\max} = 20 \Omega$) zgłaszany jest komunikat, informujący o przekroczeniu dopuszczalnego zakresu. W programie istnieje możliwość obsługi cyfrowego termometru z czujnikiem DS18B20 firmy *Dallas Semiconductor*. Aktualna temperatura jest mierzona po wprowadzeniu rezystancji do układu stałotemperaturowego. Ponieważ stanowisko nie jest wyposażone w cyfrowy czujnik wilgotności, aktualna wartość wilgotności względnej należy wprowadzić ręcznie do programu. Przycisk „Ustaw R ” powoduje automatyczny zapis parametrów pracy układu pomiarowego oraz temperaturę i wilgotność do pliku, którego nazwa składa się z aktualnej daty i godziny (rok miesiąc dzień godzina minuta). Układ CCC2002 zostaje załączony po zaznaczeniu opcji „Włącz CCC2002”. Wówczas nazwa zakładki zostaje podświetlona na niebiesko.

3.3. Konfiguracja parametrów eksperymentu

Program *anemoPomiar* umożliwia wykonania jednego z trzech typów pomiarów: pomiar uśredniony, ciągły lub N -próbek. Uśredniony pomiar napięć uruchamia się w zakładce „POMIAR-AUTOMAT.” (rys. 3a). W celu usprawnienia wykonywania eksperymentu wprowadzono możliwość automatycznej zmiany prędkości, położenia sondy oraz możliwość powtórzenia pomiaru zadaną liczbę razy. Kolejność wykonywania operacji może być dowolnie konfigurowana za pomocą trzech rozwijanych list wyboru („Kolejność wykonywania pomiarów”) z następującymi możliwościami:

- „Prędkość” – umożliwia pomiary dla zadanych prędkości z zakresu od v_{\min} do v_{\max} zmienianej co Δv ,
- „Obrót” – umożliwia pomiary dla obrotu sondy wokół własnej osi od α_{\min} do α_{\max} zmienianej co $\Delta \alpha$,
- „Liczba powtórzeń” – umożliwia kilkakrotne powtórzenie pomiaru,
- „Położenie” – umożliwia ustawienie współrzędnych położenia sondy,
- „Brak” – opcja dostępna tylko dla dwóch ostatnich list.



Rys. 3. a) Panel do ustawiania parametrów eksperymentu wykonywanego automatycznie; b) Okno do wprowadzania współrzędnych położenia sondy; c) Panel do ustawiania pomiaru ciągłego i N -próbek

Wybranie jednej z możliwości powoduje, że nie pojawia się już na pozostałych rozwijanych listach wyboru. Reguła ta nie dotyczy pozycji *Brak*, która może być wybrana na dwóch ostatnich listach.

Stanowisko pomiarowe nie zostało wyposażone w cyfrowy koordynatometr XYZ. Dlatego nie było możliwości zautomatyzowania eksperymentów dla wybranego obszaru pomiarowego. Wybranie opcji

„*Położenie*” na jednej z list wyboru powoduje pojawienie się dodatkowego okna z możliwością ręcznego wprowadzenia aktualnych współrzędnych położenia sondy (rys. 3b). Zaakceptowanie współrzędnych (przycisk „OK”) powoduje wykonanie pomiaru i ponowne pojawienie się okna. Procedura ta jest powtarzana dopóki nie zostaną wykonane pomiary dla wszystkich punktów pomiarowych w badanym obszarze. Przycisk „Anuluj” kończy eksperyment.

Po ustawieniu wszystkich parametrów wykonywany jest pomiar („*START*”). Jeżeli do systemu podłączony jest cyfrowy czujnik temperatury, w każdym „punkcie” pomiarowym mierzona jest temperatura. Pomiar może zostać w każdej chwili przerwany po wciśnięciu przycisku „*STOP*”.

Uśrednione napięcia pomiarowe rysowane są na bieżąco na wykresie i zapisywane automatycznie do pliku o nazwie podanej w polu „*Nazwa pliku*” z rozszerzeniem **.dat*. Każdorazowo do pliku zapisywane są: aktualna prędkość, kąt obrotu sondy, numer eksperymentu, uśredniona wartość napięć pomiarowych w wybranych kanałach, odchylenie standardowe od wartości średniej dla każdego kanału, temperatura, wilgotność oraz współrzędne położenia sondy (tabela 1). Dla łatwiejszej analizy danych istnieje możliwość zapisywania pomiarów pogrupowanych według pierwszej listy wyboru do różnych plików (opcja „*Rozdziel dane*”). I tak, jeżeli nadrzędną pętlą wykonywania eksperymentu jest „*Prędkość*” do nazwy pliku dodawana jest wartość aktualnej prędkości, a w pliku znajdują się pomiary wykonane tylko dla tej prędkości.

Tab. 1. Struktura pliku z danymi dla pomiaru uśrednionego

v [m/s]	α [°]	n	U_1 [V]	U_2 [V]	δu_1	δu_2	T [°C]	RH[%]	x [mm]	y [mm]	z [mm]
0.4	0	1	0.86198	0.84967	0.00059183	0.00059141	27.625	37	0	0	0
0.4	5	1	0.86092	0.84651	0.00058409	0.00057126	27.625	37	0	0	0
0.4	10	1	0.86188	0.84829	0.00060610	0.00057894	27.625	37	0	0	0
0.4	15	1	0.86400	0.84719	0.00061180	0.00061351	27.625	37	0	0	0
0.4	20	1	0.87348	0.85633	0.00059276	0.00059157	27.625	37	0	0	0

Parametry do pomiaru ciągłego oraz pomiaru N -próbek ustawiane są w zakładce „*POMIAR-RECZNY*” (rys. 3c). Pomiar ciągły polega na pomiarze napięć z zadaną częstotliwością próbkowania i rysowaniu ich na bieżąco na wykresie, do momentu przerywania pomiarów (przycisk „*STOP*”). Natomiast pomiar N -próbek to pomiar zadanej liczby próbek z zadaną częstotliwością próbkowania, bez uśredniania. Pomiar ten umożliwi wyznaczenie prędkości chwilowej oraz analizę zjawisk szybkozmiennych. Napięcia pomiarowe oraz czas w jakim zostały zmierzone zapisywane są do pliku, którego nazwa znajduje się w polu „*Nazwa pliku*”.

W zakładce „*POMIAR-RECZNY*” można zadać konkretną wartość prędkości przepływu („*Zadaj v* ”) oraz ustawić sondę w zadanym położeniu („*Zadaj kąt*”). Jako położenie początkowe sondy uznawane jest położenie w jakim znajdowała się sonda w momencie włączenia programu. Istnieje możliwość zmiany tego położenia, na wybrane przez użytkownika po wciśnięciu przycisku „*Położenie '0'*”.

3.1. Wybór algorytmu pomiarowego

W celu łatwiejszej wizualizacji nie tylko danych pomiarowych, ale również wyliczonych na ich podstawie wartości składowych wektora prędkości, czy różnicy napięć, do programu wprowadzono możliwość wyboru konkretnego algorytmu pomiarowego („*Menu Ustawienia – Algorytm pomiarowy*”):

„*Napięcia*” – rysowane są napięcia pomiarowe,

„*Różnica napięć*” – rysowana jest różnica napięć na końcach włókna dla sondy z włóknem dzielonym (Socha i Ligęza, 2007),

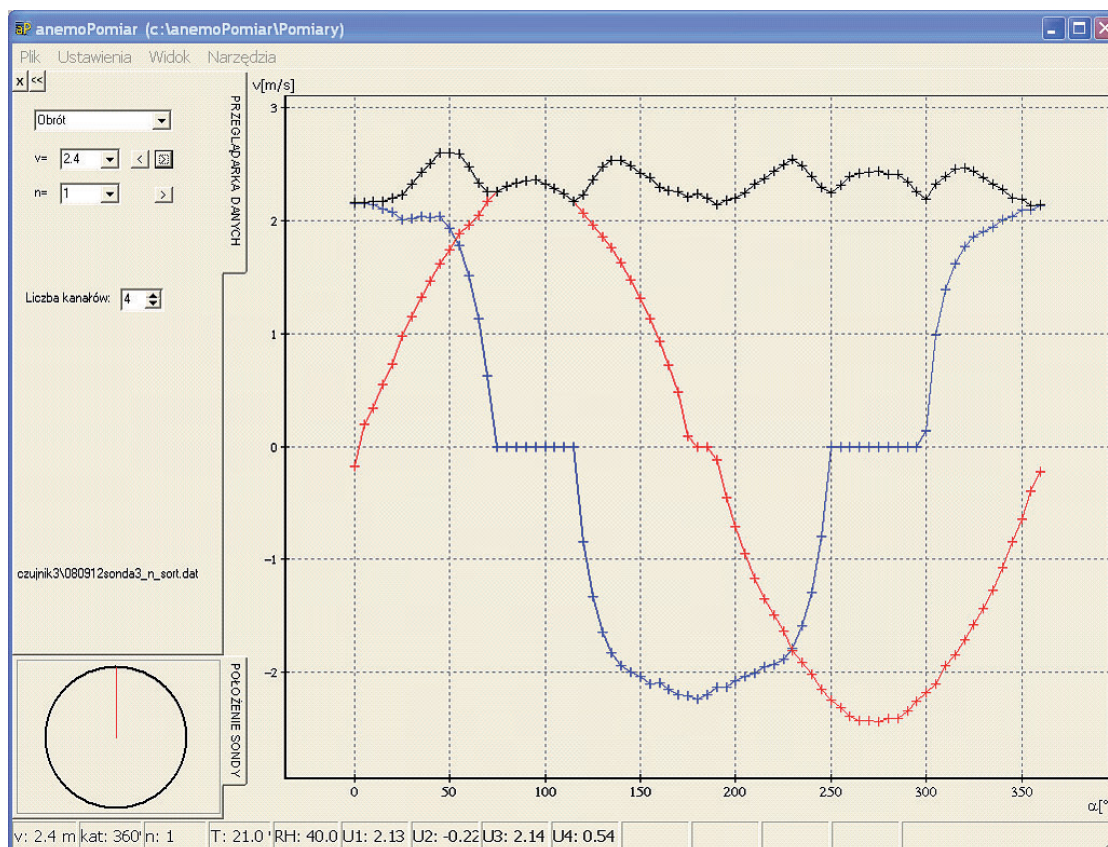
„*Wartości bezwzględne składowych wektora prędkości*” – rysowane są bezwzględne wartości składowych wektora prędkości oraz moduł wektora prędkości,

„*Wektor prędkości*” – rysowane są składowe wektora prędkości z uwzględnieniem ich znaku oraz wartość modułu prędkości (Socha i Ligęza, 2008).

W celu poprawnego rysowania wyliczonych wartości należy wcześniej wprowadzić parametry czujnika. Wybranie z „*Menu Ustawienia*” opcji „*Parametry czujnika*” powoduje pojawienie się okna z możliwością ręcznego wprowadzenia wartości parametrów lub ich wczytania z pliku o rozszerzeniu **.dan*. Parametry mogą być zapisane do pliku w celu ich ponownego wykorzystania w kolejnych eksperymentach.

3.2. Przeglądanie danych pomiarowych

Program *anemoPomiar* może służyć również do przeglądania danych pomiarowych (rys. 4). Po wybraniu z „Menu Plik” opcji „Wczytaj pomiar” pojawia się okno dialogowe do odczytu pliku z danymi. Wczytanie pliku z danymi powoduje, pojawienie się nowego panelu bocznego: „Przeładowarka danych”. Umożliwia on wybranie wartości wyświetlanej na osi X oraz wybranie przebiegu dla wybranych parametrów eksperymentu. Przykładowo, wybranie opcji „Obrót” spowoduje możliwość wyświetlenia wykresu w funkcji kąta obrotu dla wybranej wartości prędkości (v) oraz konkretnego numeru eksperymentu (n). Zapisane w wybranym pliku napięcia mogą być automatycznie przeliczone zgodnie z wybranym algorytmem obliczeniowym.



Rys. 4. Okno z możliwością przeglądania danych pomiarowych

4. Podsumowanie

Przedstawiona w pracy aplikacja *anemoPomiar* umożliwia przeprowadzenie pomiarów termooanemometrycznych. Oprogramowanie to umożliwia testowanie i weryfikację nowych metod pomiarowych, wzorcowanie sond termooanemometrycznych (wyznaczenie charakterystyki $U(v)$). Zapis danych do pliku umożliwia ich późniejszą analizę i wizualizację w specjalistycznych programach, takich jak: Matlab, Statistica, Excel, Surfer, itp.

Oprogramowanie to może być rozwijane i dostosowywane do różnorodnych badań z dziedziny metrologii przepływów. W miarę potrzeb będzie ono uzupełniane o nowe algorytmy pomiarowe oraz funkcje do cyfrowej obróbki sygnałów (np. transformata Fouriera), ułatwiające kontrolowanie poprawności wykonywania eksperymentów. Rozbudowa stanowiska pomiarowego o nowe elementy ułatwiające przeprowadzanie eksperymentów, (np. cyfrowy koordynatometr, czujnik wilgotności względnej) będzie wiązała się również z zaimplementowaniem nowych algorytmów sterowania.

Literatura

- Ciombor K., 2004. *Programowany termoanemometryczny system pomiarowy*. Mechanizacja i Automatyizacja Górnictwa, t. 8, s. 5–11.
- Gawor M., Socha K., 2004. *Struktura oprogramowania i możliwości metrologiczne sterowanego komputerowo wielokanałowego termoanemometrycznego systemu pomiarowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 6, nr 3-4, s. 195–204.
- Jamróz P., Ligeza P., 2006. *Stanowisko do badań charakterystyk kierunkowych czujników przepływu w zakresie małych prędkości*. (w:) *Materiały IX Konferencji Naukowej Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE2006*. Zakopane.
- Ligeza P., Socha K., 2005. *Laboratoryjny termoanemometryczny system pomiarowy do badania dynamiki przepływów*. (w:) *Materiały konferencyjne, PD 2005*, s. 113–119. Szczyrk.
- Ligeza P., 2003. *Sterowany komputerowo termoanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcje sterowanego układu statotemperaturowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 5, nr 2, s. 237-244.
- Manual USB-6009. *User guide and specifications USB-6008/6009*.
- Socha K., Ligeza P., 2007. *Dwuwłóknowa sonda termoanemometryczna do pomiaru wektora prędkości z uwzględnieniem zwrotu przepływu*. (w:) *Materiały konferencyjne IX Ogólnopolskiego Sympozyum Zastosowanie Mechaniki Płynów w Inżynierii i Ochronie Środowiska*. s. 209-217, Wisła.
- Socha K., Ligeza P., 2008. *Studies of a hot-wire anemometric probe for the measurement of twodimensional components and sense of a velocity vector*. Measurement Science and Technology, t. 19, 085402, (11 p.).

Application supporting hot-wire anemometry measurements

Abstract

Article presents hot-wire anemometry measurements software. It allows controlling measuring site as well as acquisition and visualization measurement data. There are implement algorithms for typical one-, two- and three-wire sensors and for sensors with divided-wire to sense detected.

Keywords: hot-wire anemometry, acquisition and visualization measurement data, measurement algorithm

Recenzent: Dr hab. Marek Gawor, Instytut Mechaniki Górotworu PAN