

Intensywność turbulencji w nowym tunelu aerodynamicznym Instytutu Mechaniki Górotworu PAN – cz. I

SOBCZYK JACEK, GAWOR MAREK

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki termooanemometrycznych pomiarów poziomu turbulencji w funkcji prędkości $I_t(v)$ w przestrzeni pomiarowej w zakupionym w 2013 roku tunelu aerodynamicznym z obiegiem zamkniętym. Pomiary wykonane z wykorzystaniem standardowej, jednowłóknowej sondy termooanemometrycznej. Wyniki pomiarów w centralnym punkcie przestrzeni pomiarowej wykazały, że wartości współczynnika intensywności turbulencji $I_{t,max}$ w tym miejscu utrzymują się poniżej poziomu 0,5%. Stwierdzono, że niewielki wzrost $I_{t,max}$ obserwowany dla niższych prędkości może być wynikiem niestabilnej pracy silnika wentylatora lub podatności układu pomiarowego na zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez zespół napędowy wraz z falownikiem.

Słowa kluczowe: turbulencje, tunel aerodynamiczny

1. Wstęp

W 2013 roku Instytut Mechaniki Górotworu PAN (IMG PAN) zakupił nowoczesny tunel aerodynamiczny z obiegiem zamkniętym, dedykowany przede wszystkim do pomiarów nieinwazyjnymi metodami optycznymi. Jak większość zaawansowanych tuneli aerodynamicznych jest to produkt jednostkowy i został wykonany na podstawie oryginalnego projektu autorstwa pracowników IMG PAN. Mimo zastosowania najnowocześniejszych technik projektowania i wykonania, faktyczne właściwości takiego tunelu w momencie przekazania go do użytku pozostawały jeszcze zagadką. Poznanie tych właściwości jest zadaniem użytkownika końcowego.

Dotychczas sprawdzono i zaprezentowano m.in., że podstawowe parametry przepływu w przestrzeni pomiarowej są zgodne z założeniami projektu koncepcyjnego [1]. Jednak, aby tunel ten mógł być skutecznie wykorzystywany w aktualnych pracach badawczych wymaga dalszych wysiłków zmierzających do gruntownego sprawdzenia i poznania jego właściwości. Prace takie prowadzone są w sposób doraźny, ale systematyczny.

Wyidealizowanym założeniem projektowym opisywanego typu tunelu aerodynamicznego jest zazwyczaj uzyskanie przepływu ustalonego w całym zakresie prędkości oraz w całej objętości przestrzeni pomiarowej. W praktyce nie jest to możliwe. W szczególności zjawisko formowania się warstwy przyściennej znacząco zmniejsza powierzchnię przekroju poprzecznego przepływu, o którym można powiedzieć, że ma stałą prędkość (np. z dokładnością do 1%), czyli tzw. rdzenia potencjalnego.

Wymogiem postawionym wobec producenta tunelu było, aby przekrój rdzenia potencjalnego przepływu stanowił co najmniej 80% przekroju poprzecznego przestrzeni pomiarowej. W obszarze rdzenia wszystkie parametry przepływu powinny osiągać założone wartości.

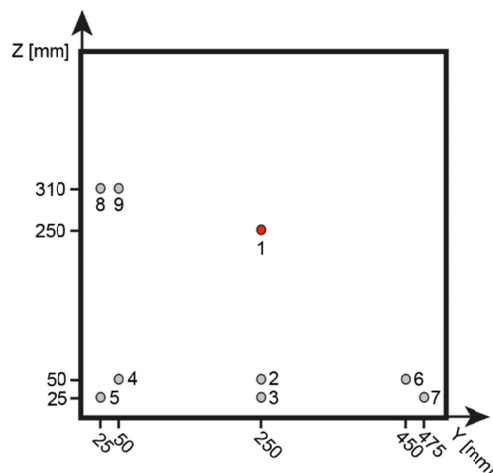
W niniejszej pracy skupiono się na analizie stopnia lokalnego zaburzenia przepływu, który wyrażono poprzez współczynnik intensywności turbulencji¹ I_t zmierzony w wybranych punktach przekroju przestrzeni pomiarowej.

¹ Współczynnik intensywności turbulencji obliczono jako stosunek odchylenia standardowego SD zmierzonego, czasowego przebiegu prędkości do jej wartości średniej.

2. Pomiary

W czasie sprawdzania parametrów przepływu w komorze pomiarowej zamkniętej [2] tunelu wykonano m.in. pomiary intensywności turbulencji w funkcji prędkości $I_t(v)$. Wykonano je za pomocą termooanemometru stałotemperaturowego ze standardową, jednowłóknową sondą o średnicy włókna 5 mikrometrów, produkcji IMG PAN. Włókno skierowane było prostopadle do kierunku napływu. Sondę umieszczano w dziewięciu wybranych punktach przekroju poprzecznego przestrzeni pomiarowej (Rys. 1) tak, aby określić stopień zaburzeń przepływu:

- w rdzeniu potencjalnym przepływu,
- w pobliżu ścian i w rogach komory pomiarowej,
- w śladzie sondy termometru znajdującego się w konfuzorze.



Rys. 1. Ponumerowane punkty pomiarowe zaznaczone w przekroju poprzecznym komory pomiarowej tunelu

Obok sondy termooanemometrycznej w skład zestawu pomiarowego wchodziły jeszcze:

- cyfrowy anemometr-termometr CCC2000,
- karta przetwornikowa NI USB-6251 BNC,
- zasilacz laboratoryjny z symetrycznymi wyjściami,
- komputer PC z oprogramowaniem LabVIEW 2014.

Zestaw ten został wywzorcowany na stanowisku pomiarowym tunelu z wykorzystaniem anemometru typu Schmidt w zakresie 0.07-2.5 m/s oraz rurki spiętrzającej Pitota w zakresie 2.5-60 m/s.

Pomiary $I_t(v)$ przebiegały według następującego schematu. Jako reprezentacyjny ustalono przekrój poprzeczny komory pomiarowej zlokalizowany w $X = 200$ mm od wlotu. Wybrano w nim dziewięć punktów pomiarowych wskazanych na rys. 1 o współrzędnych odpowiednio Y i Z w mm: #1: (250, 250), #2: (250, 50), #3: (250, 25), #4: (50, 50), #5: (25, 25), #6: (450, 50), #7: (475, 25), #8: (25, 310), #9: (50, 310). W punktach tych wykonano pomiary prędkości przepływu dla następujących ustawień karty przetwornikowej:

- liczba próbek $N = 32\ 000$,
- częstotliwość próbkowania f zmienna, równa częstotliwości falownika tunelu pomnożonej przez 10^3 .

Zakres częstotliwości falownika wentylatora f_f to 0-50 Hz, co przekłada się na zakres prędkości tunelu 0-62 m/s. Sumaryczna droga, jaką powietrze musi pokonać przy jednym obiegu tunelu to ok. 30 m. Biorąc pod uwagę wartość N , częstotliwość f została dobrana tak, aby pomiar zawsze trwał w przybliżeniu jeden obieg powietrza w tunelu. Taki dobór parametrów akwizycji miał na celu:

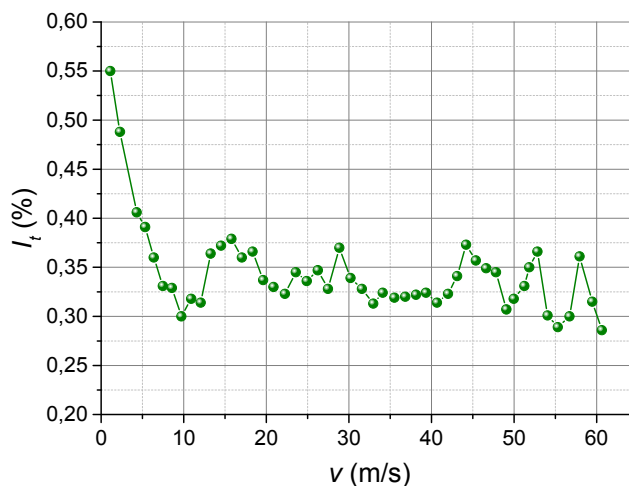
- umożliwić rejestrację spektrum częstotliwości w możliwie szerokim zakresie charakterystycznych struktur turbulentnych dla każdej prędkości,
- umożliwić analizę krótkookresowej stabilności przepływu.

Pomiary prędkości w punkcie #1 wykonano dla 50 ustawień falownika w całym zakresie prędkości tunelu, dla pozostałych punktów wybrano po 7-8 ustawień falownika.

Z uwagi na obszerny materiał graficzny w aktualnej, I części opracowania zaprezentowano wyłącznie wyniki pomiarów wykonanych w punkcie #1. Pozostałe zostaną umieszczone w części II.

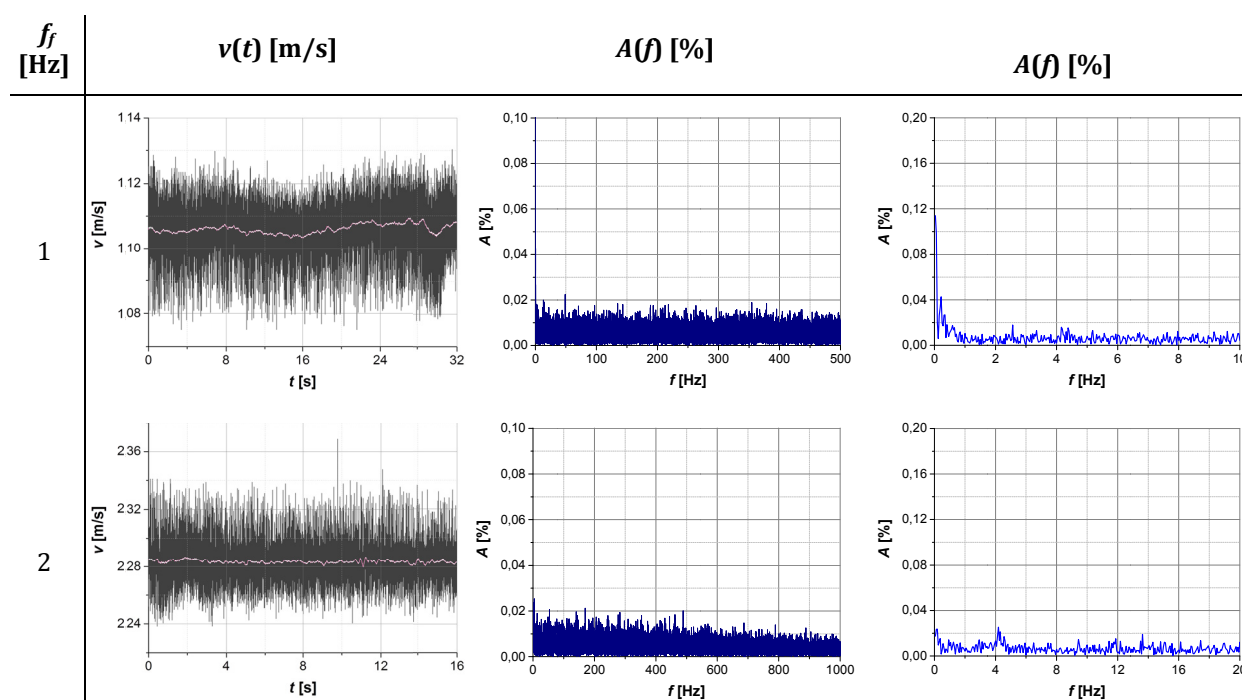
3. Prezentacja wyników

Analiza wyników pomiarów przeprowadzonych w punkcie #1 ujawniła, że w niemal całym zakresie prędkości w tym położeniu sondy, można spodziewać się intensywności turbulencji poniżej poziomu 0.4%. Jedynie dla prędkości najniższych, poniżej 4 m/s, odnotowano wartości $I_t(v)$ nieco wyższe – rzędu 0.5% (Rys. 2).

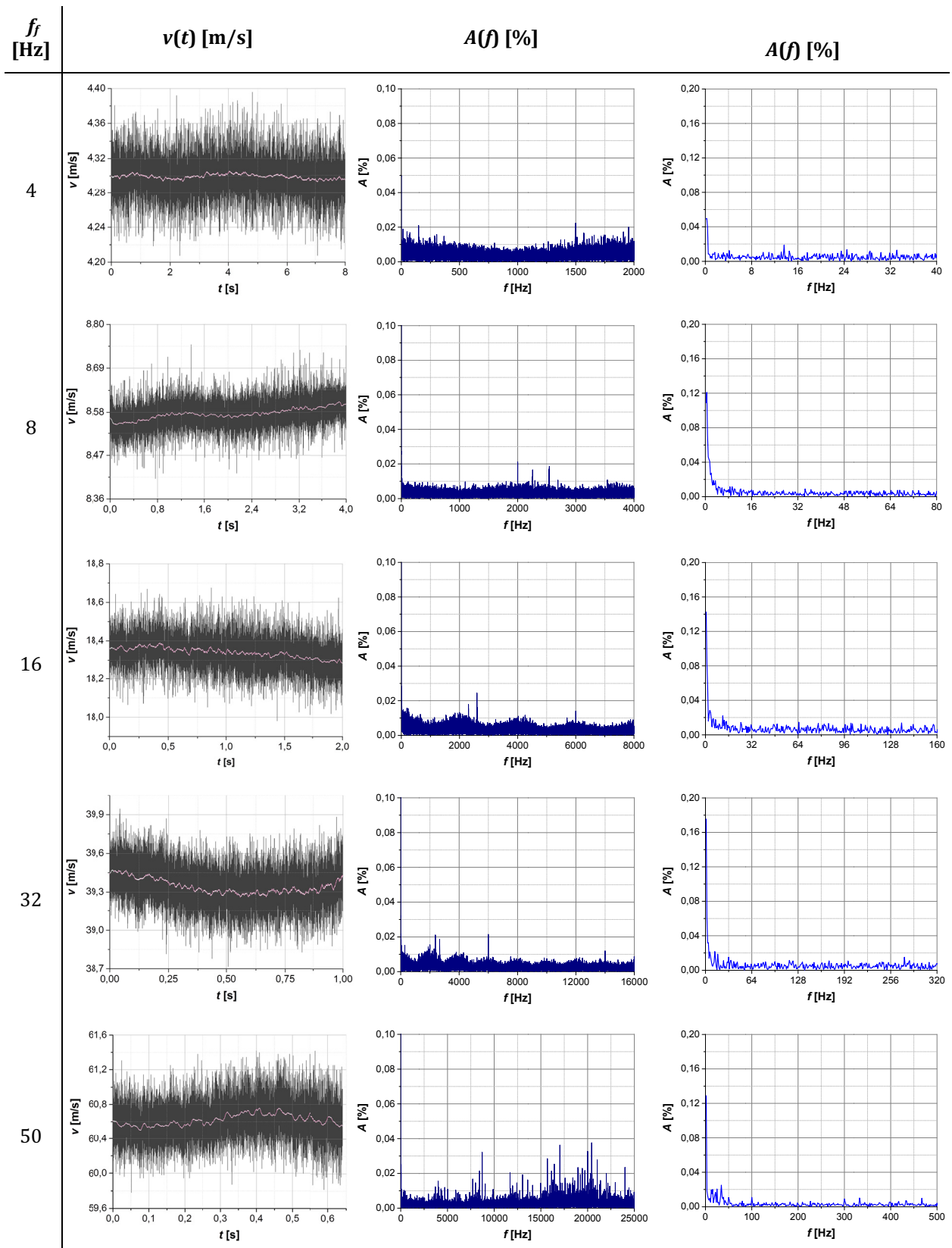


Rys. 2. Wykres intensywności turbulencji w funkcji prędkości w centralnym punkcie przekroju

Zarejestrowane przebiegi czasowe prędkości, których reprezentacyjny zbiór przedstawiono na rysunku 3, wskazują na dobrą stabilność krótkookresową wartości średniej, określonej tu za pomocą 321-punktowej średniej kroczącej². Wahania tego parametru zwykle nie przekraczają 0.5% wartości średniej. Widmo amplitudowe (Rys. 3) w zakresie średnich i dużych częstotliwości wykazuje brak lub bardzo słabe pojawienie się częstotliwości charakterystycznych. Jego wartości na ogół nie przekraczają 0.02% wartości prędkości średniej. Analiza korelacyjna również nie ujawniła obecności żadnych struktur koherentnych, dlatego pominięto prezentację wykresów funkcji autokorelacji.



² ybór tej metody uśredniania przebiegu funkcji $v(t)$ wynika z dużego zakresu zmienności częstotliwości pomiarów. Przy podanych parametrach akwizycji przebiegi średnich liczą w każdym przypadku po 99 punktów.



Rys. 3. Zarejestrowane przebiegi czasowe prędkości (wraz ze średnimi kroczącymi – kolumna pierwsza), ich widma amplitudowe unormowane do prędkości średniej i wyrażone w procentach (kolumna druga) oraz te same widma ograniczone do najniższych częstotliwości (kolumna trzecia)

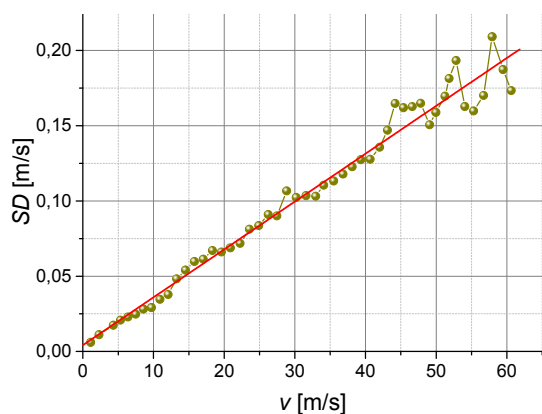
W zakresie niskich częstotliwości widać podobną tendencję. Jedynie w przypadkach, gdy zarejestrowany przebieg wykazywał „falowanie” prędkości średniej, zaznaczyło się to nieznacznym wzrostem wartości kilku pierwszych składowych szeregu Fouriera.

4. Dyskusja wyników

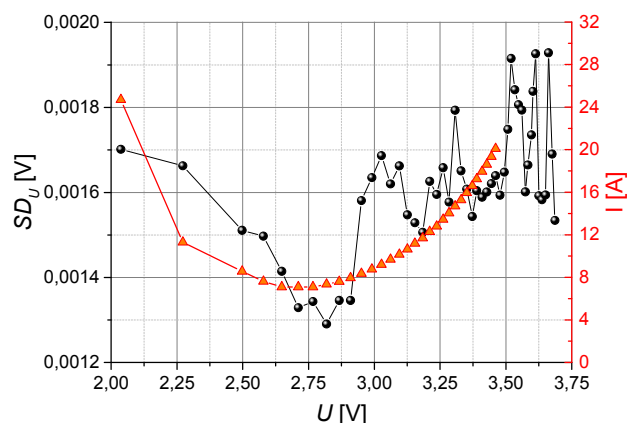
Uzyskane wartości intensywności turbulencji są w pełni zadowalające, zważywszy na przeznaczenie tunelu oraz parametry określone w projekcie koncepcyjnym. Jednak symptomatyczny jest wzrost tego parametru dla małych prędkości. Może to być związane z nieco gorszą optymalizacją budowy tunelu dla tego zakresu prędkości, bądź z wysokim poziomem szumów toru pomiarowego.

Sprawdzenie pierwszej potencjalnej przyczyny wymaga szerszych badań, natomiast stosunkowo łatwo zanalizować wpływ drugiego z wymienionych czynników. Na rysunku 4 zaprezentowano zależność odchylenia standardowego od prędkości średniej dla zarejestrowanych przebiegów. Wyraźnie oscylują one wokół prostej, którą w celach poglądowych dopasowano do tej zależności. Widoczny stały, umiarkowany wzrost oscylacji prędkości wraz ze wzrostem prędkości średniej jest naturalny dla tunelu aerodynamicznego tej klasy. Natomiast niezerowy współczynnik translacyjny dopasowanej prostej wskazuje na pośrednią przyczynę wzrostu parametru $I_t(v)$ dla małych prędkości. W celu identyfikacji przyczyny bezpośredniej konieczna jest analiza sygnałów w przestrzeni napięć, a nie prędkości.

Zależność napięcia względem prędkości na wyjściu zastosowanego układu CCC2000 jest silnie nieliniowa. Opisuje ją powszechnie znane równanie Kinga. Powrót do przestrzeni napięć pozwala usunąć tę nieliniowość i przekonać się, jak kształtuje się zmienność sygnału napięciowego wraz ze wzrostem napięcia średniego (krzywa łamana z punktami węzłowymi w kształcie kół na rysunku 5). Jak wynika z rysunku 5 wartości odchylenia standardowego napięcia SD_U utrzymują się na podobnym poziomie w całym zakresie mierzonych napięć z wyjątkiem małego przedziału od ok. 2,6 do 2,9 V, co odpowiada przedziałowi prędkości od ok. 6 do 12 m/s. Spadek wartości funkcji $SD_U(U)$ w tym przedziale świadczy o tym, że poziom szumów własnych toru pomiarowego jest nie większy niż ok. 0,0013 V, a więc nie był składnikiem dominującym w wynikach uzyskanych dla najniższych prędkości.



Rys. 4. Wykres odchylenia standardowego w funkcji prędkości w centralnym punkcie przekroju



Rys. 5. Wykres odchylenia standardowego sygnału napięciowego w centralnym punkcie przekroju

Okazało się natomiast, że zaprezentowany przebieg funkcji $SD_U(U)$ wykazuje zaskakująco dużą zbieżność z poborem prądu przez zespół napędowy tunelu, jeśli wykreślić ją w funkcji prędkości w przestrzeni pomiarowej $I(v)$, a w tym przypadku w funkcji napięć na termoanemometrze $I(U)$ (krzywa łamana z punktami węzłowymi w kształcie trójkątów na rysunku 5). Zbieżność ta jest na tyle duża, że może wskazywać na główne źródło analizowanego problemu.

Przebieg funkcji $I(U)$ wymaga komentarza. Zgodnie z oświadczeniem producenta, w skład modułu napędowego wchodzi jeden wentylator napędzany jednobiegowym silnikiem prądu przemiennego o konstrukcji pozwalającej na sterowanie obrotami za pomocą falownika. Charakterystyka prądowa w zakresie średnich i wysokich obrotów wynika głównie z pracy, którą silnik wykonuje przy tych obrotach. Natomiast

zwiększony pobór prądu z zakresie niskich obrotów jest konsekwencją konieczności stabilizacji pracy silnika tzw. prądem rozruchu.

Z powyższej uwagi wynika, że dla najniższych prędkości praca silnika może być niestabilna, a to z kolei może przekładać się negatywnie na stabilność przepływu w przestrzeni pomiarowej. Kuriozalnie zatem, analiza parametrów pracy systemu pomiarowego doprowadziła do pewnych wniosków nt. budowy tunelu aerodynamicznego, a w szczególności kultury pracy modułu napędowego.

5. Uwagi końcowe

Istnieje jeszcze jedno zjawisko fizyczne, które może być odpowiedzialne za przebieg funkcji $SD_{U}(U)$ wykazany na rysunku 5. Sonda termooanemometryczna jest odcinkiem przewodnika umieszczonym w nieekranowanej elektromagnetycznie przestrzeni. Falownik wentylatora w tunelu oraz do pewnego stopnia silnik wentylatora są źródłami silnych zakłóceń elektrycznych oraz elektromagnetycznych. Zakłócenia elektryczne były filtrowane poprzez podłączenie wszystkich urządzeń toru pomiarowego do zasilacza awaryjnego pracującego w tzw. trybie on-line, a więc były izolowane galwanicznie od zakłóceń obecnych w sieci energetycznej. Natomiast niemożliwe było całkowite wyeliminowanie zakłóceń elektromagnetycznych. Silnik wentylatora oraz falownik pracują w uziemionych osłonach metalowych, co w dużej mierze eliminuje takie zakłócenia. Jednak podczas pomiarów tak precyzyjnym przyrządem jak termooanemometr konieczne jest sprawdzenie intensywności tego typu zakłóceń (oczywiście poza przestrzenią pomiarową), ponieważ w przypadku fal elektromagnetycznych również występuje zależność pomiędzy natężeniem prądu płynącego przez nadajnik i intensywnością sygnału odbieranego przez odbiornik.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych 2016-2017 realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Bundyra M., Gawor M., Sobczyk J., *Analiza parametrów przepływu w tunelu aerodynamicznym z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 17, No. 3-4 (2015).
- [2] Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J., *Tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 15, No. 1-2 (2013).

Turbulence intensity in the new wind tunnel in Strata Mechanics Research Institute of the PAS – part I

Abstract

Investigation of the turbulence intensity conducted with use of hot-wire measurements in the new closed circuit wind tunnel was presented. Measurements were done by means of standard, single-wire hot-wire head. Results in the center point of the measurement area revealed that values of the turbulence intensity parameter $I_{t,max}$ keep below level of 0.5%. Small but noticeable increase of this parameter for the lowest velocities may be the result of instabilities of the fan engine work or electromagnetic disturbances.

Keywords: turbulence, wind tunnel