

## BADANIA PRZEPIYU POWIETRZA WOKÓŁ OBIEKTU ARCHITEK- TONICZNEGO ZA POMOCĄ TRANSFORMATY FFT

Katarzyna KLEMM\*, Krzysztof PIESZYŃSKI\*\*,  
Kazimierz ROŻNIAKOWSKI\*\*

\*Politechnika Łódzka, Instytut Architektury I Urbanistyki

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

\*\*Politechnika Łódzka., Instytut Fizyki ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź

**Streszczenie:** W pracy oszacowano parametry transformaty FFT dla sygnału optycznego, powstającego w wyniku propagacji wąskiej wiązki światła lasera w strefie napływu powietrza na nieopływającą przeszkodę. Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym, którego poprzeczne rozmiary były dużo większe od rozmiarów modelu. Analizę wyników badań przeprowadzono zarówno w oparciu o parametry transformaty FFT jak i na podstawie parametrów zaproponowanego w pracy równania opisującego obwiednię krzywej  $F(v) \cdot v$  w funkcji  $v$ .

**Słowa kluczowe:** parametry FFT, model obiektu, laser, propagacja światła.

### 1. WPROWADZENIE

Wiadomo, że za pomocą transformaty Fouriera  $F(v)$  funkcji  $f(t)$  zależnej od czasu, dokonuje się przekształcenia przestrzeni czasowej w przestrzeń częstotliwościową. Ta transformacja jest w niniejszej pracy opisywana związkami [1]:

$$F(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i2\pi vt} dt \quad (1)$$

gdzie  $v$  – oznacza częstotliwość,  $t$  – czas

Mówiąc bardzo zwięźle, sens fizyczny transformaty można wyrazić stwierdzając, że przedstawia ona sobą widmo składowych harmonicznych budujących funkcję  $f(t)$ . Ponieważ z zasady transformata Fouriera jest funkcją zespoloną zmiennej rzeczywistej  $v$ , oznacza to, że niesie ona informację o dwóch parametrach. Najprościej wyjaśnić można rolę tych parametrów w oparciu o przedstawienie Eulera liczby zespolonej. Duże wartości modułu  $F(v)$  w określonym zakresie częstotliwości oznaczają duży wkład związa-

nych z tymi częstotliwościami harmonicznych w budowę funkcji  $f(t)$ . Analogicznie, małe wartości modułu  $F(v)$  oznaczają mały wkład związanych z tymi częstotliwościami harmonicznych w budowę tejże funkcji. Analiza związków fazowych poszczególnych harmonicznych nie będzie przedmiotem tej pracy.

Szczególnie istotna jest informacja o rozkładzie energii na poszczególne harmoniczne, tworzące czasowy przebieg  $f(t)$ . Ponieważ energia w ruchu harmonicznym jest proporcjonalna do iloczynu kwadratu amplitudy i kwadratu częstości, stąd właśnie w wielu badaniach analizowany jest iloczyn  $F(v) \cdot v$ .

Ponadto, ze względu na fakt, że w tych badaniach dane eksperymentalne nie mogą być zbierane w sposób ciągły, to w rzeczywistości liczone dyskretną transformatę Fouriera. Dla przyspieszenia tych obliczeń zastosowano algorytm szybkiej transformaty Fouriera (FFT).

Celem badań przeprowadzonych w tej pracy jest wykazanie, na drodze eksperymentalnej, że umieszczenie w tunelu, w przepływającej strudze powietrza modelu obiektu w postaci sześciangu, powoduje zmiany parametrów charakteryzujących FFT (dokładniej parametrów obwiedni) w stosunku do przepływu nie zakłóconego obecnością modelu.

### 2. EKSPERYMENT

Szczegółowy opis przeprowadzonych badań eksperymentalnych, jak parametry tunelu i modelu obiektu, pomiar prędkości przepływu powietrza, parametrów wiązki laserowej, detekcję sygnału optycznego oraz procedurę badań opisano w pracy [2].

### 3. WYNIKI BADAŃ

Otrzymane wyniki badań podzielono jak w pracy [2] na dwie, następujące grupy zagadnień pomiarowych:

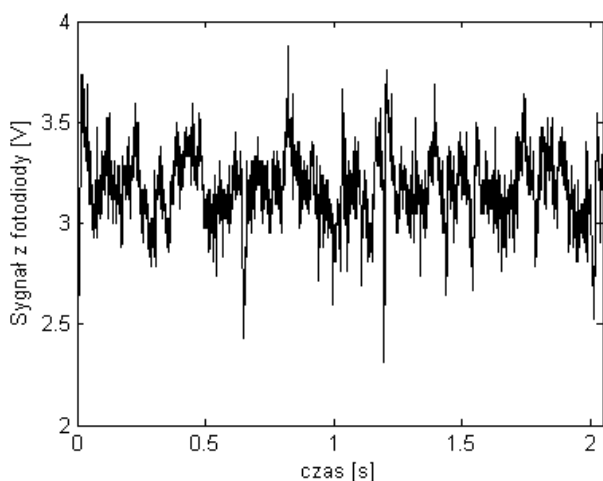
1. badania parametrów FFT laserowego sygnału optycznego podczas przepływu powietrza w tunelu, w którym nie jest umieszczony model,
2. badania parametrów FFT sygnału optycznego w obecności modelu obiektu, od strony napływającego powietrza w różnych odległościach od modelu.

Zarejestrowane sygnały (w obu przypadkach) opracowano w następujący sposób: a) obliczono  $FFT_s(v)$  sygnału b) obliczono  $FFT_{sz}(v)$  sygnału bez przepływu powietrza (szum), następnie od wielkości obliczonej w punkcie a) odjęto wielkość obliczoną w punkcie b), otrzymany wynik pomnożono przez częstotliwość  $v$ .

Przykładowy sygnał optyczny przedstawiono na rysunku 1, jego transformatę FFT na rys. 2, a ostateczny wynik opisanych wyżej obliczeń na rys. 3. Zatem, na tym rysunku, na osi pionowej przedstawiono wielkość eksperymentalną, opisaną równaniem :

$$y_{eksp} = [FFT_s(v) - FFT_{sz}(v)] \cdot v \quad (2)$$

a na osi poziomej częstotliwość  $v$ .



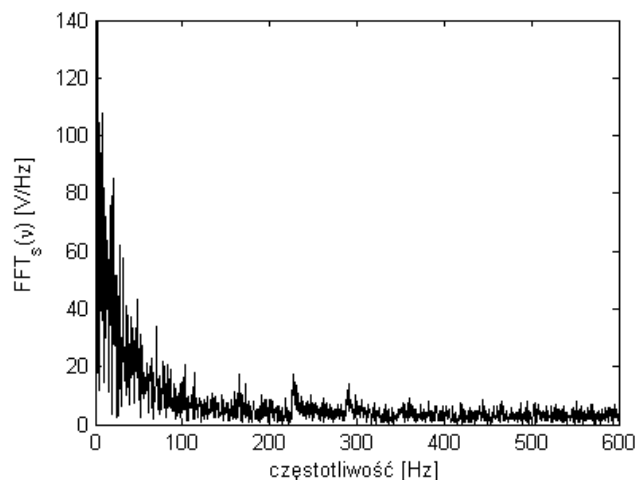
Rys. 1. Fluktuacje natężenia światła w funkcji czasu dla prędkości 0,5 m/s powietrza przepływającego w tunelu.

Fig.1. Time fluctuation of the light intensity. The air in the wind tunnel flew with the speed 0.5m/s.

Następnie, tak obliczoną funkcję (przedstawioną graficznie na rysunku 3 za pomocą czarnej linii) aproksymowano stosując metodę najmniejszych kwadratów według formuły (linia biała na rysunku 3):

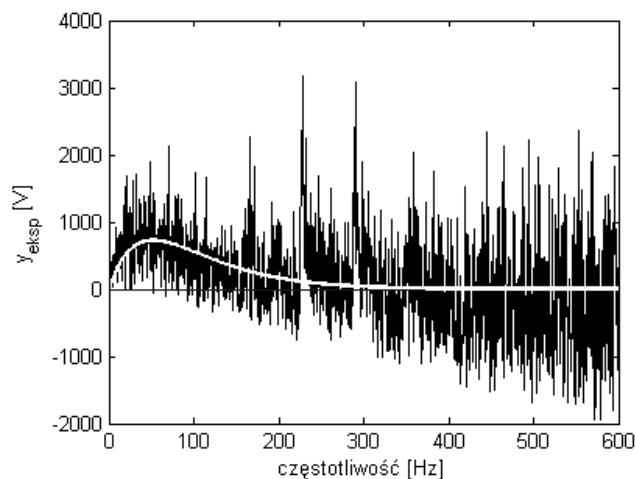
$$y = a \cdot x \cdot \exp(-(x - b)/c). \quad (3)$$

gdzie:  $a, b, c$  są wielkościami stałymi (parametrami wyznaczonymi w tych badaniach), natomiast  $x$  jest częstotliwością ( $x=v$ ).



Rys. 2. Transformata Fouriera FFT dla fluktuacji natężenia światła (sygnału) przedstawionych na rys. 1.

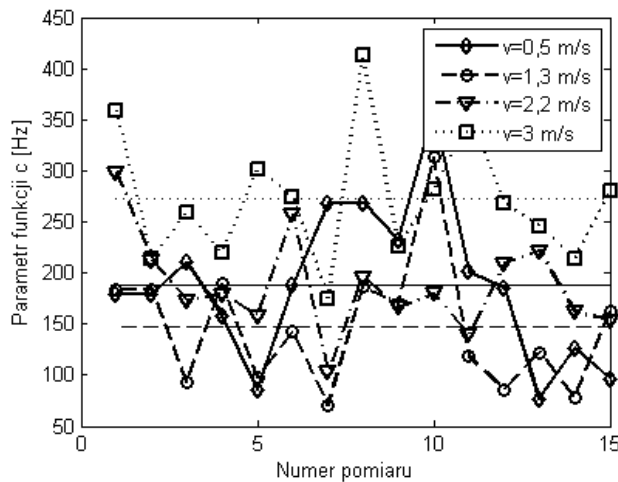
Fig.2. Fourier transform of the curve (time fluctuation of the light intensity) which is shown in Fig. 1.



Rys. 3. Graficzny wynik przekształcenia: (FFT sygnału - FFT szumu) po pomnożeniu przez częstotliwość w zależności od częstotliwości.

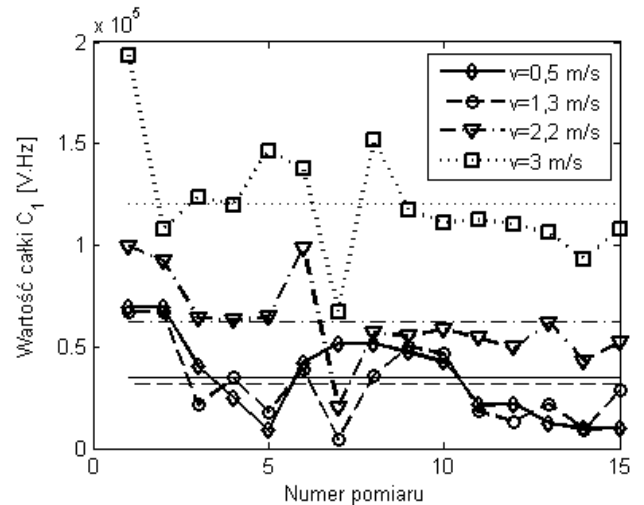
Fig.3. The black line shows the  $y_{eksp}$  in Eq.(2). The white line ( $y$  in Eq.(3)) was fitted to the points laying on the black line using the least squares method.

Wyniki obliczeń dla przypadku przepływu bez modelu (swobodny przepływ powietrza w tunelu) przedstawiono na kolejnych rysunkach: 4,5,6,7,8,9,10,11.



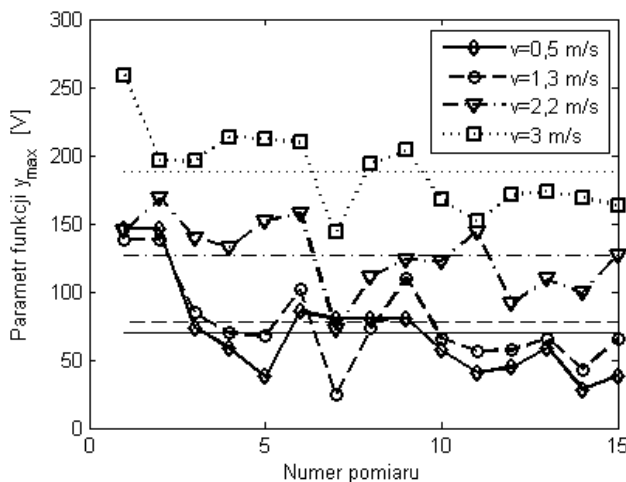
Rys. 4. Parametr  $c$  funkcji  $y$  w zależności od numeru pomiaru (serii) z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkości przepływu podano na rysunku).

Fig.4. The value of  $c$  parameter of  $y$  function (Eq.(3)) for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel. For the each speed the  $c$  parameter was measured 15 times.



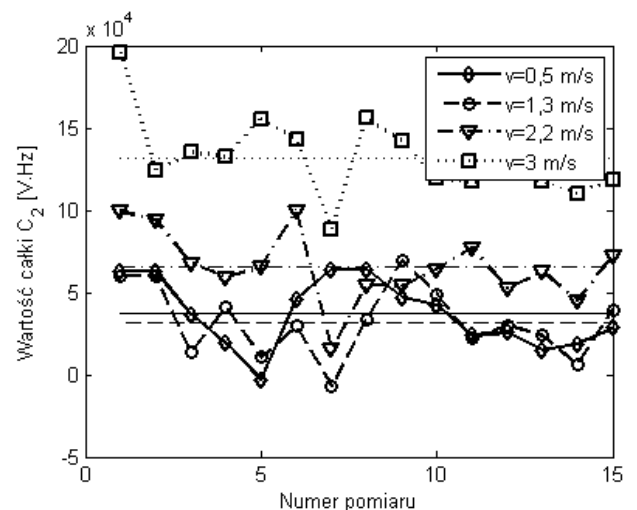
Rys. 6. Parametr  $C_1$  (całka ) funkcji  $y$  w zależności od numeru pomiaru (serii) z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkości przepływu podano na rysunku).

Fig.6. The value of  $C_1$  parameter (the integral of  $y$  function (Eq.(3))) for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel. For the each speed the  $c$  parameter was measured 15 times.



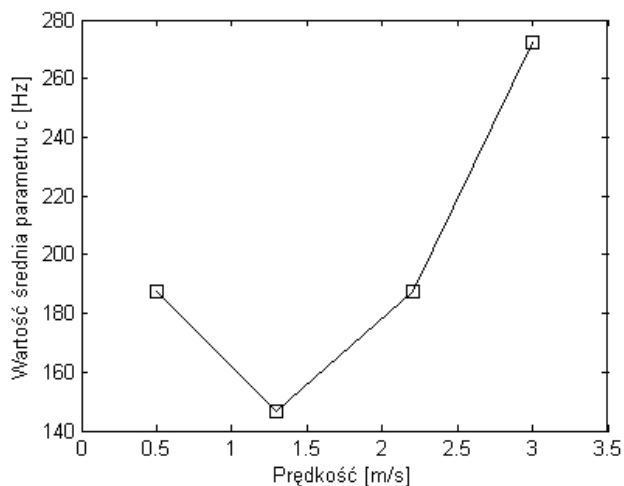
Rys. 5. Parametr  $y_{max}$  funkcji  $y$  w zależności od numeru pomiaru (serii) z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkości przepływu podano na rysunku).

Fig.5. The value of  $y_{max}$  implicit parameter of  $y$  function (Eq.(3)) for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel. For the each speed the  $c$  parameter was measured 15 times.

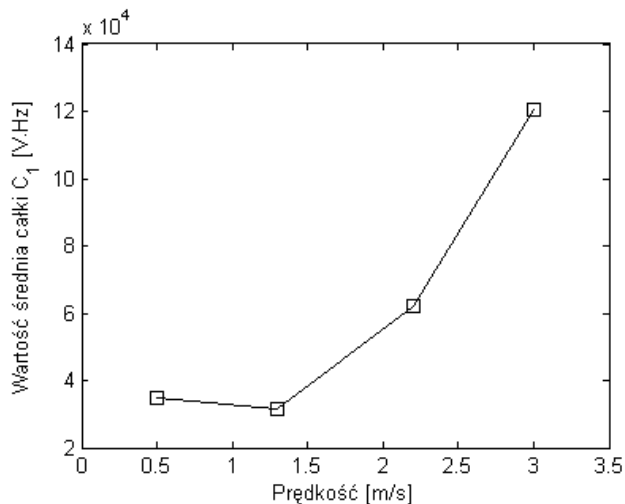


Rys. 7. Parametr  $C_2$  (całka z pomiarów eksperymentalnych) w zależności od numeru pomiaru (serii) z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkości przepływu podano na rysunku).

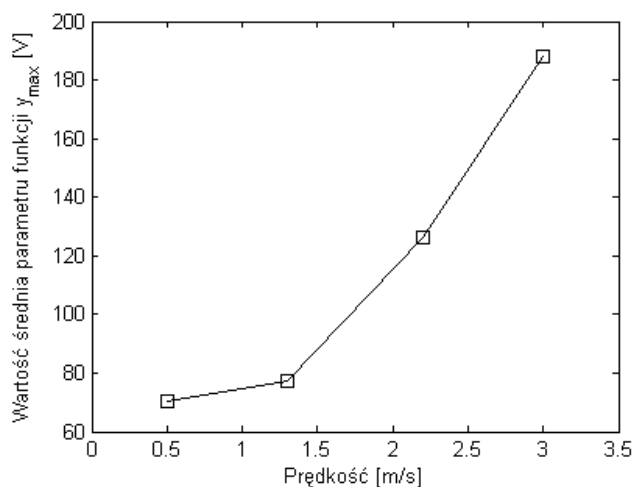
Fig.7. The value of  $C_2$  parameter (the integral of  $y_{exp}$  function (Eq.(2))) for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel. For the each speed the  $c$  parameter was measured 15 times.



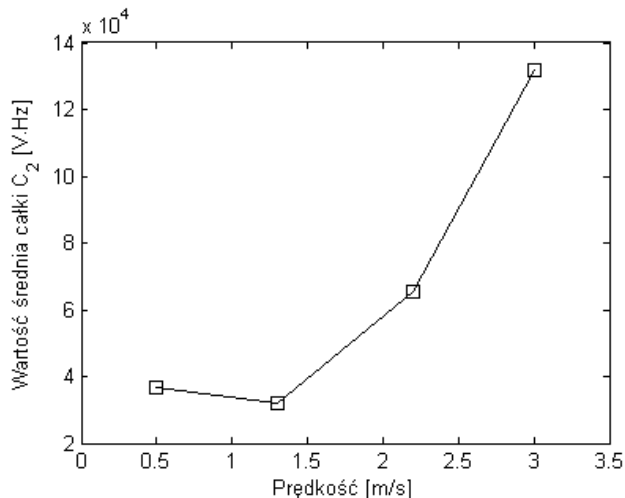
Rys. 8. Zależność parametru  $c$  (wartość średnia) od prędkości napływu powietrza w tunelu (bez modelowego obiektu).  
Fig.8. The dependence of the  $c$  parameter mean value on the speed of the air inflow in the wind tunnel without object model.



Rys. 10. Zależność wartości całki  $C_1$  (wartość średnia) od prędkości napływu powietrza w tunelu, bez modelu obiektu.  
Fig.10. The dependence of the  $C_1$  parameter mean value on the speed of the air inflow in the wind tunnel without object model.



Rys. 9. Zależność parametru  $y_{max}$  (wartość średnia) od prędkości napływu powietrza w tunelu (bez modelu obiektu).  
Fig.9. The dependence of the  $y_{max}$  parameter mean value on the speed of the air inflow in the wind tunnel without object model.

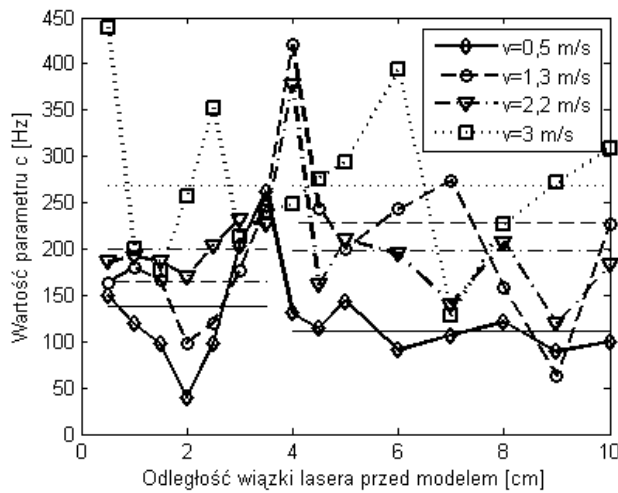


Rys. 11. Zależność wartości całki  $C_2$  (wartość średnia) od prędkości napływu powietrza w tunelu, bez modelu obiektu.  
Fig.11. The dependence of the  $C_2$  parameter mean value on the speed of the air inflow in the wind tunnel without object model.

Na rysunkach 4,5,6,7 liniami poziomymi zaznaczono wartości średnie odpowiednich parametrów dla różnych prędkości, natomiast na rysunkach 8,9,10,11 przedstawiono te średnie wartości parametrów w funkcji prędkości napływającego powietrza.

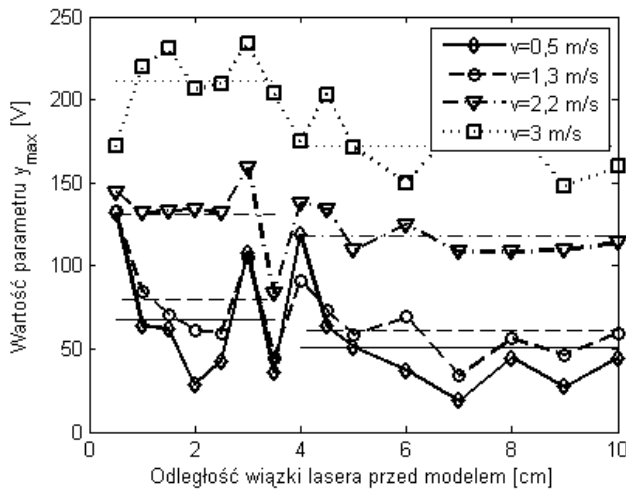
W analogiczny sposób wyznaczono parametry funkcji  $y$  dla sygnału optycznego w przypadku, gdy w tunelu umieszczony jest modelowy obiekt. Laserowa wiązka jest propagowana od strony napływającego powietrza, zmieniano odległość wiązki od badanego obiektu w zakresie takim jak w pracy [1].

Otrzymane wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń przedstawiono na rysunkach: 12, 13,14, 15.



Rys. 12. Parametr  $c$  w zależności od odległości od modelu obiektu budowlanego, z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkość napływu podano na rysunku).

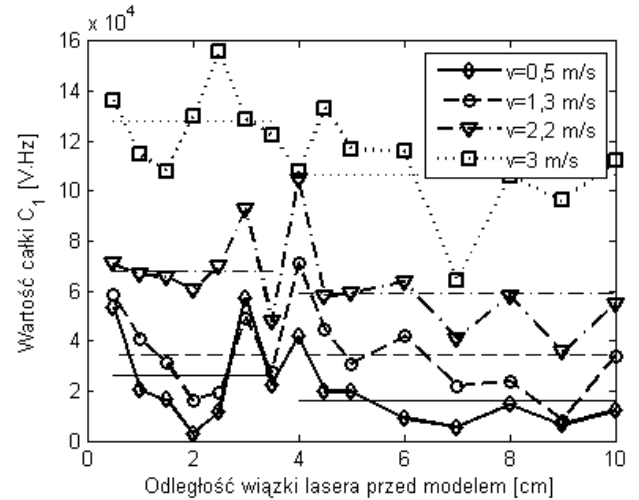
Fig.12. The value of  $c$  parameter of  $y$  function (Eq.(3)) versus the distance from the building object model for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel.



Rys. 13. Parametr funkcji  $y_{max}$  w zależności od odległości od modelu obiektu budowlanego, z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkość napływu podano na rysunku).

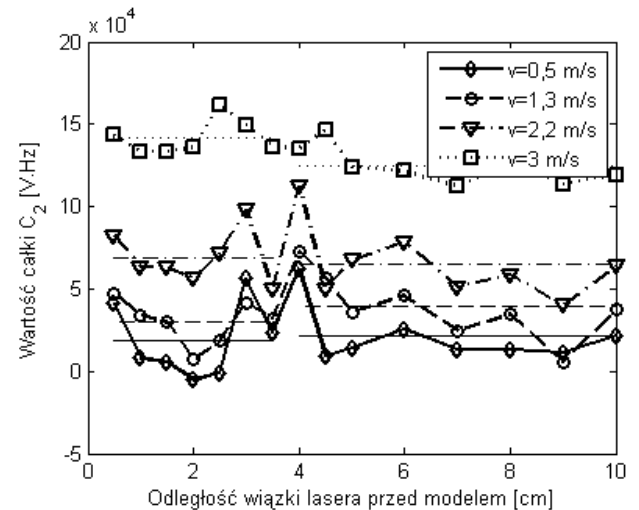
Fig.13. The value of  $y_{max}$  implicit parameter of  $y$  function (Eq.(3)) versus the distance from the building object model for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel.

Analogicznie jak w pierwszym przypadku, linie poziome oznaczają wartości średnie parametru dla różnych prędkości. Wartości te były obliczone dla dwóch różnych zakresów odległości, to znaczy od 0,5 do 3,5 cm i od 4 do 10 cm.



Rys. 14. Wartość całki  $C_1$  w zależności od odległości od modelu obiektu budowlanego, z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkość napływu podano na rysunku).

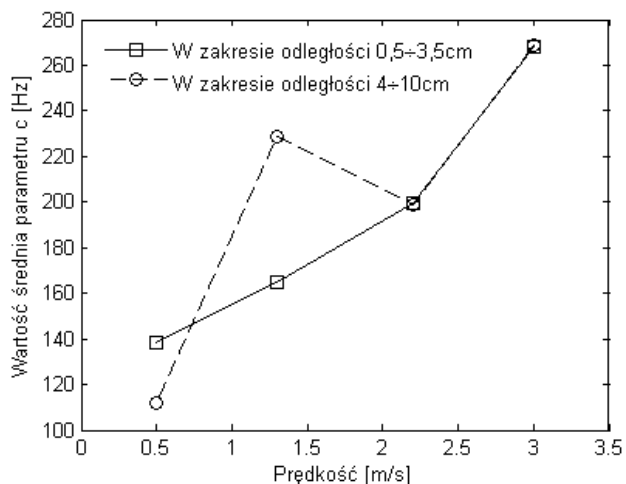
Fig.14. The value of  $C_1$  parameter (the integral of  $y$  function (Eq.(3))) versus the distance from the building object model for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel.



Rys. 15. Wartość całki  $C_2$  (z eksperymentu) w zależności od odległości od modelu obiektu budowlanego, z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkość napływu podano na rysunku).

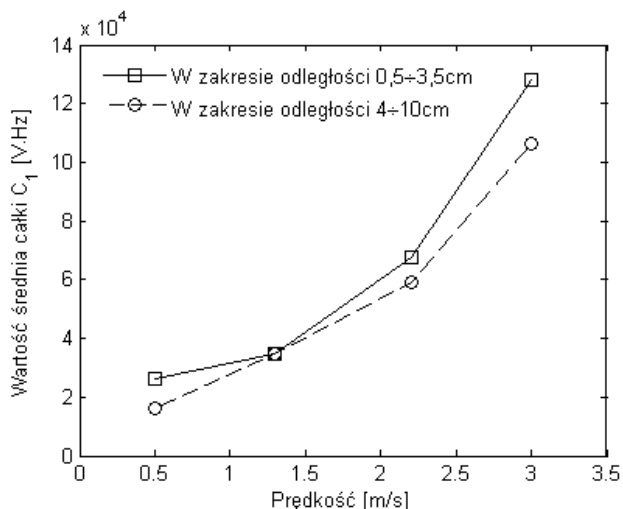
Fig.15. The value of  $C_2$  parameter (the integral of  $y_{exp}$  function (Eq.(2))) versus the distance from the building object model for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel.

Na rysunkach 16,17,18,19 przedstawiono te średnie wartości parametrów w funkcji prędkości, przy czym linia ciągła oznacza zakres od 0,5 do 3,5 cm, a linia przerywana od 4 do 10 cm.



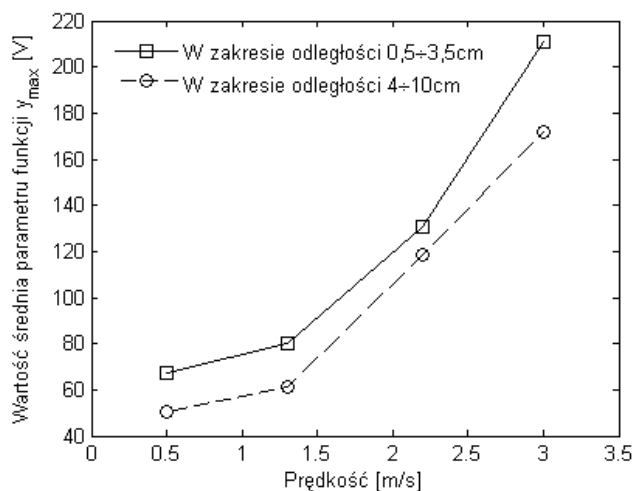
Rys. 16. Wartość średnia parametru  $c$  w zależności od prędkości napływu powietrza w tunelu (przedziały odległości od modelu podane na rysunku).

Fig.16. The mean value of the  $c$  parameter as the function of air inflow speed in the wind tunnel. Solid line - mean value of the  $c$  parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 0.5 cm to 3.5 cm. Dashed line - mean value of the  $c$  parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 4cm to 10cm.



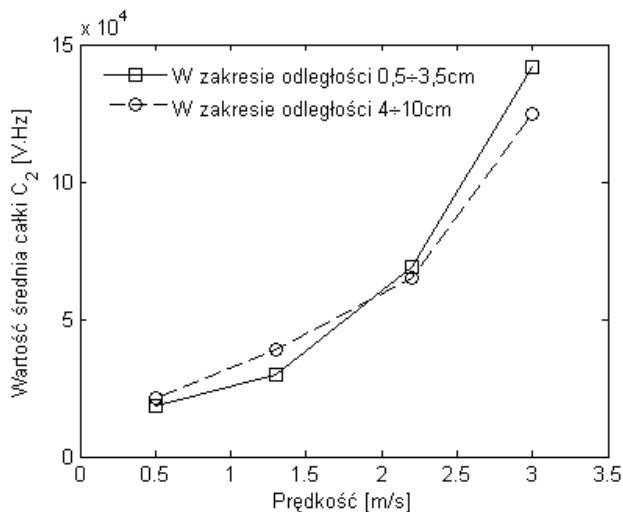
Rys.18. Wartość średnia całki  $C_1$  w zależności od prędkości napływu powietrza w tunelu (przedziały odległości od modelu podane na rysunku).

Fig.18. The mean value of the  $C_1$  parameter as the function of air inflow speed in the wind tunnel. Solid line - mean value of the  $C_1$  parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 0.5 cm to 3.5 cm. Dashed line - mean value of the  $C_1$  parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 4cm to 10cm.



Rys. 17. Wartość średnia parametru  $y_{max}$  w zależności od prędkości napływu powietrza w tunelu (przedziały odległości od modelu podane na rysunku).

Fig.17. The mean value of the  $y_{max}$  parameter as the function of air inflow speed in the wind tunnel. Solid line - mean value of the  $y_{max}$  parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 0.5 cm to 3.5 cm. Dashed line - mean value of the  $y_{max}$  parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 4cm to 10cm.



Rys.19. Wartość całki  $C_2$  z eksperymentu w zależności od prędkości napływu powietrza w tunelu (przedziały odległości od modelu podane na rysunku).

Fig.19. The mean value of the  $C_2$  parameter as the function of air inflow speed in the wind tunnel. Solid line - mean value of the  $C_2$  parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 0.5 cm to 3.5 cm. Dashed line - mean value of the  $C_2$  parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 4cm to 10cm.

Tabela 1. Średnie wartości badanych parametrów w przypadku braku modelu w tunelu.

Table 1. The mean values of the investigated parameters in the absence of a object model in the wind tunnel.

Prędkość napływu powietrza	Średnie wartości parametrów			
	c	y <sub>max</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
m/s	[Hz]	[V]	[V·Hz]	[V·Hz]
0,5	1,88E+02	7,03E+01	3,48E+04	3,68E+04
1,3	1,47E+02	7,73E+01	3,17E+04	3,20E+04
2,2	1,87E+02	1,26E+02	6,22E+04	6,56E+04
3,0	2,72E+02	1,88E+02	1,20E+05	1,32E+05

Tabela 2. Średnie wartości badanych parametrów w obecności modelu w tunelu.

Table 2. The mean values of the investigated parameters in the presence of the object model in the wind tunnel.

Prędkość napływu powietrza	Średnie wartości parametrów			
	c	y <sub>max</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
m/s	[Hz]	[V]	[V·Hz]	[V·Hz]
0,5	1,38E+02	6,75E+01	2,63E+04	1,83E+04
	1,12E+02	5,07E+01	1,62E+04	2,14E+04
1,3	1,65E+02	7,98E+01	3,46E+04	3,00E+04
	2,29E+02	6,10E+01	3,46E+04	3,91E+04
2,2	1,99E+02	1,31E+02	6,77E+04	6,93E+04
	1,99E+02	1,18E+02	5,94E+04	6,53E+04
3,0	2,68E+02	2,11E+02	1,28E+05	1,42E+05
	2,69E+02	1,72E+02	1,07E+05	1,25E+05

#### 4. Dyskusja i wnioski

Porównując wartości parametrów funkcji y (równanie (3) oraz odpowiednie rysunki i tabele) dla przypadków bez modelu i z modelem widoczna jest największa różnica w wartościach tego parametru, w badanym zakresie prędkości dla odległości 0-3,5cm od modelu, a więc w obszarze, gdzie występuje wir podkowiasty oraz podstawowe punkty separacji (pierwotny i wtórny). Ponadto, w tym obszarze występuje także ujemny gradient ciśnienia i zmiana kierunku przepływu powietrza nad powierzchnią (nad podłożem nad którym umieszczony jest obiekt) [3].

W przedziale odległości od 4cm do 10cm obserwuje się znacznie mniejsze różnice w wartościach parametrów dla przypadków przepływu z obiektem w tunelu i bez obiektu (górny wiersz liczb w Tabeli 2 dotyczy odległości 0,5cm do

3,5 cm od modelu, natomiast dolny wiersz odległości od 4cm do 10cm).

Przeprowadzone badania (podobnie jak w pracy [2]), mogą stanowić podstawę zastosowania optycznej metody laserowej, wykorzystując do tego celu rejestrację fluktuacji natężenia światła laserowego, powstających podczas jego propagacji w strefie napływającego powietrza na prostopadłościenną bryłę. Na podstawie tych pomiarów wyznaczono parametry FFT (obwiedni funkcji y). Z wyników badań tych parametrów widać, że zawarta jest w nich informacja o charakterze strumienia przepływającego powietrza wokół modelu.

Ponieważ zastosowana w tej metodzie laserowa wiązka światła nie zaburza przepływu strumienia powietrza, w przeciwieństwie do czujników stosowanych w metodach konwencjonalnych, to dlatego też, ta metoda może być szczególnie przydatna w przypadku gdy badania propagacji światła prowadzone są przed obiektem na który napływa strumień powietrza.

Metoda ta ma także zalety w stosunku do metod wizualizacji, ponieważ można przy jej pomocy wyznaczyć wartości liczbowe parametrów występujących w opisie tego zjawiska za pomocą FFT (parametrów propagacji laserowej wiązki w powietrzu w którym występują fluktuacje gęstości, temperatury, ciśnienia – czyli współczynnika załamania światła).

#### EXAMINATION OF THE AIR FLUCTUATION SPECTRUM FLOWING AROUND ARCHITECTURAL OBJECT USING FOURIER TRANSFORM

**Summary:** In this paper, the Fourier transform parameters were assessed for optical signal which was obtained in consequence of narrow laser beam propagation through the air inflow zone in front of non-streamlined body. The investigations were carried out in the wind tunnel. The cross section of the wind tunnel was a square and the length of the square side was much bigger than the size of architectural object (model of building object). Experimental outcomes were analyzed taking into account both parameters of Fourier transform and parameters of the formula which was proposed in this paper.

#### Literatura

- [1]. Encyklopedia Fizyki, Tom 1, PWN, Warszawa 1972.
- [2]. Klemm K., Pieszyński K., Roźniakowski K., "Wizualizacja turbulentnego przepływu powietrza w strefie obiektu architektonicznego za pomocą parametru Cn", Fizyka budowlanej w teorii i praktyce, Tom V, Nr 2, Łódź 2010, 27-34.
- [3]. Hosker R.P., Flow and diffusion near obstacles, in D.Randerson (ed), Atmospheric Science and Power Production, U.S.Department of Energy, Chap. 7, 1984

