

11. ANEMOMETRIA LASEROWA

Cel ćwiczenia: *pomiar prędkości poruszających się ciał oparty na efekcie Dopplera - przesunięcie częstości światła rozproszonego.*

Przyrządy:

1. laser,
2. fotodetektor,
3. soczewka (zdolność skupiająca 1.5 dioptrii),
4. komputer klasy PC z przystawką oscyloskopową,
5. obiekt badany (tarcza z silniczkiem; rura z cieczą)

1. Wstęp:

Anemometria laserowa jest techniką wykorzystywaną w badaniach doświadczalnych z mechaniki przepływów. W 1976 roku Durst opublikował podstawy działania anemometrii. Technika ta pozwala zmierzyć lokalną wartość prędkości w określonym punkcie przepływu i czasie. Anemometria obecnie wykorzystywana jest do badania, silnie turbulentnych przepływów. Głównymi zaletami tej techniki są: bezinwazyjność, mała objętość próbkowania, możliwość ciągłego przesuwania obszaru badanego i samo kalibracja.

Metoda bezinwazyjnego pomiaru prędkości ma bardzo szerokie widmo aplikacji. Jest używana w meteorologii do mierzenia prędkości wiatru. W biologii i medycynie jest wykorzystywana między innymi do pomiaru prędkości przepływu krwi i płynów ustrojowych w badaniach *in vivo*. Często używa się tej metody w tunelach aerodynamicznych i hydrodynamicznych. Wykorzystuje się ją także w szeregu badań technicznych między innymi przy pomiarze prędkości mieszanki tłocznej do komory spalania w silnikach spalinowych. Wykorzystywane są także metody bardziej zaawansowane: dwu-, lub trójkolorowe wiązki pozwalają określać nie tylko wartość prędkości, ale także jego kierunek i zwrot na płaszczyźnie i w przestrzeni. LDA (Laser Doppler Anemometry) pozwala również na mało kosztowne badania z zakresu ochrony środowiska. Między innymi na kontrolowanie emisji drobin przez zakłady przemysłowe.

Głównym celem ćwiczenia jest przestudiowanie podstaw teoretycznych oraz ich zastosowanie w łatwo sprawdzalnym układzie (krążek plexiglasowy). Jako rozwinięcie tego ćwiczenia proponuje się studentom wykonanie pomiarów w układzie z rzeczywistym przepływem.

2. Wstęp teoretyczny:

Podstawowy teoretyczny opis laserowej anemometrii w naszym układzie oparty jest na dwóch różnych zjawiskach fizycznych. Pierwszy oparty jest na Dopplerowskim prawie przesunięcia częstości, drugi oparty jest na zjawisku interferencji. Obydwa dają te same końcowe relacje.

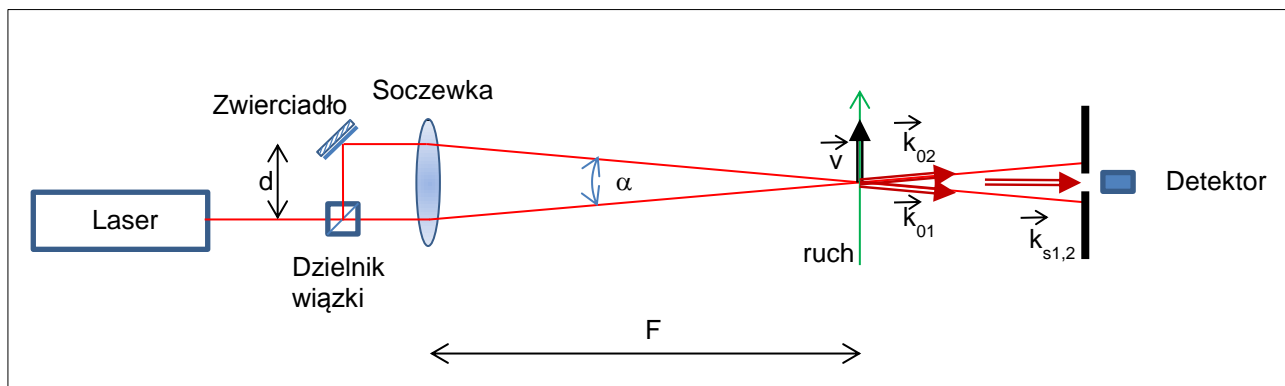
2.1. Model Dopplerowski:

Ideę anemometrii możemy najkrócej przedstawić jako interferencję pomiędzy dwiema falami świetlnymi o różnych częstościach zmodulowanych przez dopplerowskie przesunięcie częstości, gdzie funkcję modulatora pełni poruszająca się cząsteczka.

Przesunięcie częstości światła rozproszonego jest dane przez:

$$\Delta\nu = \frac{(\vec{k}_s - \vec{k}_0) \cdot \vec{v}}{2\pi} \quad (1)$$

gdzie: \vec{v} jest wektorem prędkości cząstki, \vec{k}_0 i \vec{k}_s są wektorami falowymi odpowiednio światła padającego i rozproszonego.



Rysunek 1: Model bazujący na Dopplerowskim przesunięciu częstości oraz konfiguracja doświadczenia

Jeśli więc znamy kierunki wiązki padającej i rozproszonej oraz przesunięcie częstości możemy znaleźć wartość prędkości cząstek rozpraszających. Schemat układu dwuwiązkowego anemometru laserowego przedstawiony jest na Rysunku 1. W układzie tym poruszająca się cząsteczka produkuje dwie rozproszone fale świetlne z przesunięciem częstości, danym jako:

$$\Delta\nu_1 = \frac{(\vec{k}_{s1} - \vec{k}_{01}) \cdot \vec{v}}{2\pi} \quad (2)$$

oraz:

$$\Delta\nu_2 = \frac{(\vec{k}_{s2} - \vec{k}_{02}) \cdot \vec{v}}{2\pi} \quad (3)$$

Amplitudy pola elektrycznego tych fal można (w notacji zespolonej) zapisać jako:

$$\vec{E}_{1s}(x, t) = \vec{E}_0 \cdot \exp[i(k_{s1}x - \omega_{s1}t)] \quad (4)$$

$$\vec{E}_{2s}(x, t) = \vec{E}_0 \cdot \exp[i(k_{s2}x - \omega_{s2}t)]$$

gdzie dla uproszczenia zapisu przyjęto, że fala rozproszona propaguje w kierunku osi x , a stała różnica faz pomiędzy spójnymi falami rozproszonymi wynosi 0.

Związek pomiędzy częstością, a modułem wektora falowego (liczbą falową) jest dla fal rozproszonych w powietrzu ($n = 1$, c jest prędkością światła) następujący:

$$\omega = 2\pi\nu = kc \quad (5)$$

Na podstawie *Rysunku 1* oraz zależności (2) i (3) częstości i liczby falowe obu fal rozproszonych można wyrazić następująco:

$$\omega_{s1} = \omega_0 - k_0 v \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{albo} \quad k_{s1} = k_0 \left[1 - \frac{v}{c} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right] \quad (6)$$

$$\omega_{s2} = \omega_0 + k_0 v \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{albo} \quad k_{s2} = k_0 \left[1 + \frac{v}{c} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]$$

gdzie ω_0 jest częstością kołową, a k_0 długością wektora falowego światła padającego.

Wstawiając do wzorów (4) powyższe zależności uzyskuje się dla detektora położonego na współrzędnej x_D w dowolnej chwili czasu t :

$$\vec{E}_{s1}(x_D, t) = \vec{E}_0 \cdot \exp\left\{ik_0 \left[1 - \frac{v}{c} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right] (x_D - ct)\right\} \quad (7)$$

$$\vec{E}_{s2}(x_D, t) = \vec{E}_0 \cdot \exp\left\{ik_0 \left[1 + \frac{v}{c} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right] (x_D - ct)\right\}$$

Fale te interferują na detektorze. Sygnał jest proporcjonalny do kwadratu amplitudy fali wypadkowej, a więc do:

$$\begin{aligned} I(t, x_D) &\approx EE^* = \left(\overrightarrow{E_{s1}}(x_D, t) + \overrightarrow{E_{s2}}(x_D, t) \right) \left(\overrightarrow{E_{s1}}(x_D, t) + \overrightarrow{E_{s2}}(x_D, t) \right)^* \\ &= 2E_0^2 \left\{ 1 + \cos \left[2k_0 \frac{v}{c} \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) (x_D - ct) \right] \right\} \\ &= 2E_0^2 \{ 1 + \cos(\varphi_D - \Omega t) \} \end{aligned}$$

gdzie stała faza φ_D zależy od położenia detektora, a częstotliwość sygnału na detektorze jest równa:

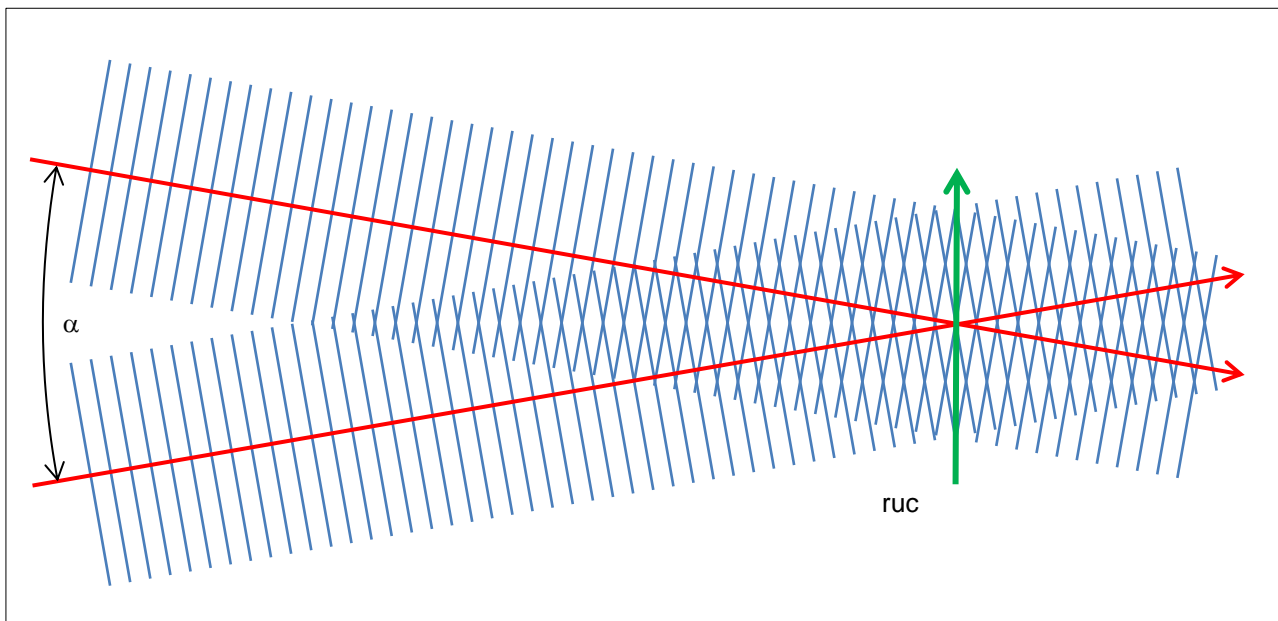
$$f_D = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot 2k_0 \frac{v}{c} \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) c = 2 \frac{v}{\lambda_0} \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (8)$$

Możemy wyrazić sinus przez długość ogniskowej F i odległość d między wiązkami:

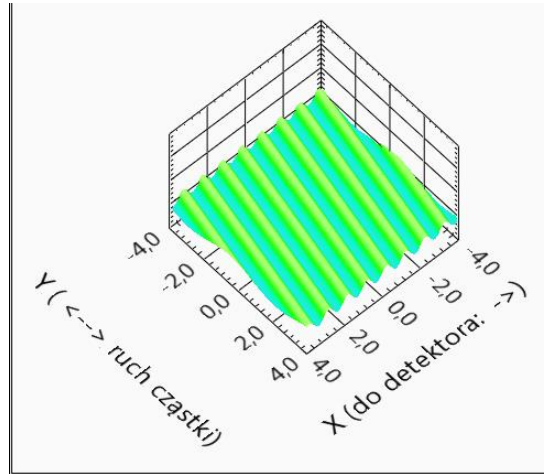
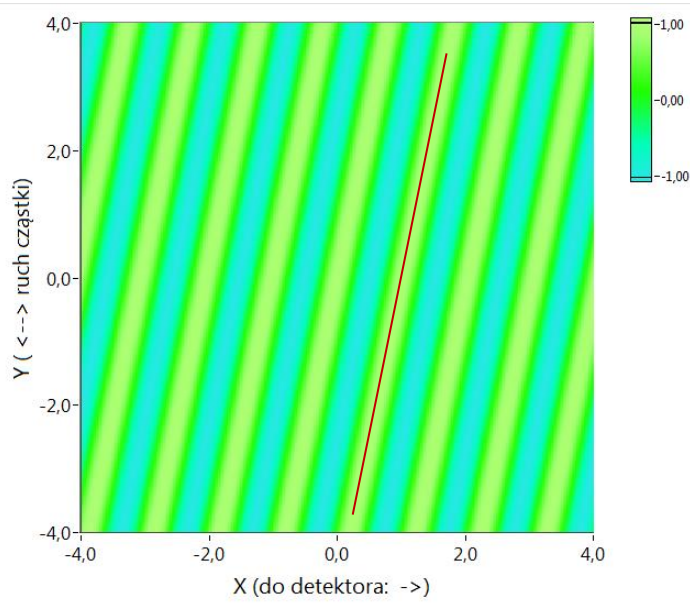
$$\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) = \frac{d}{\sqrt{d^2 + 4F^2}} \quad (9)$$

2.2. Model prążkowy:

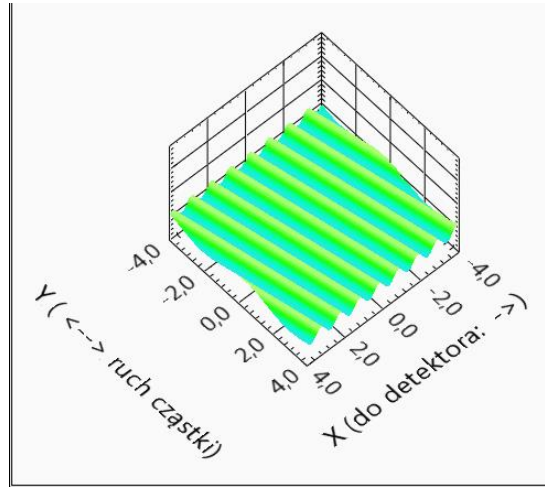
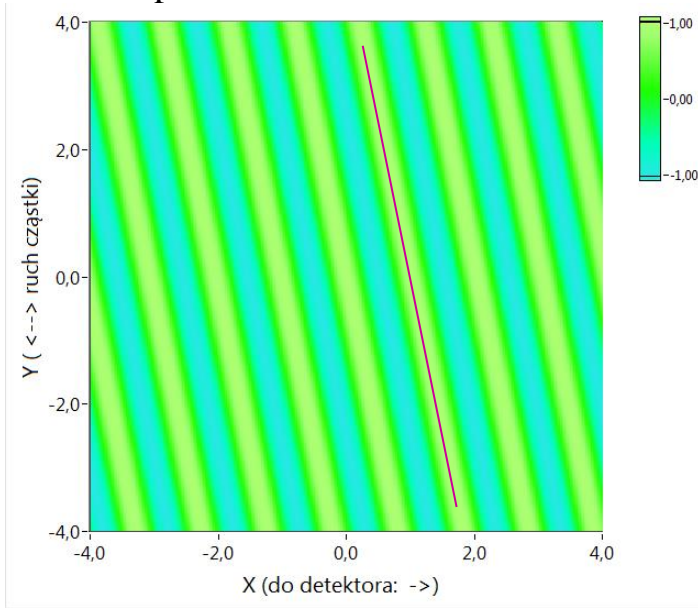
Interferencja wiązek świetlnych w obszarze badanym tworzy układ równo-oddalonych prążków (jasnych i ciemnych pasów - zobacz *Rysunki 2-4*).



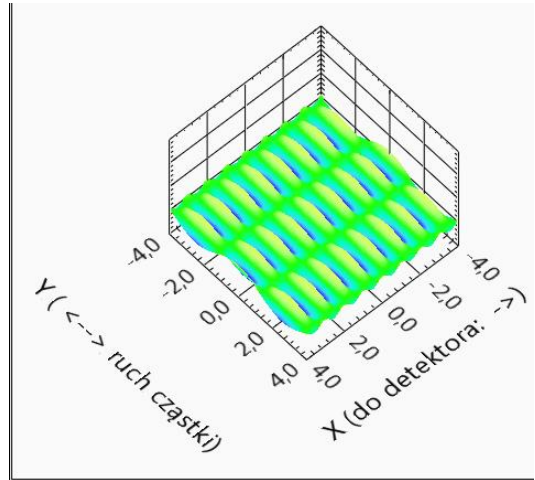
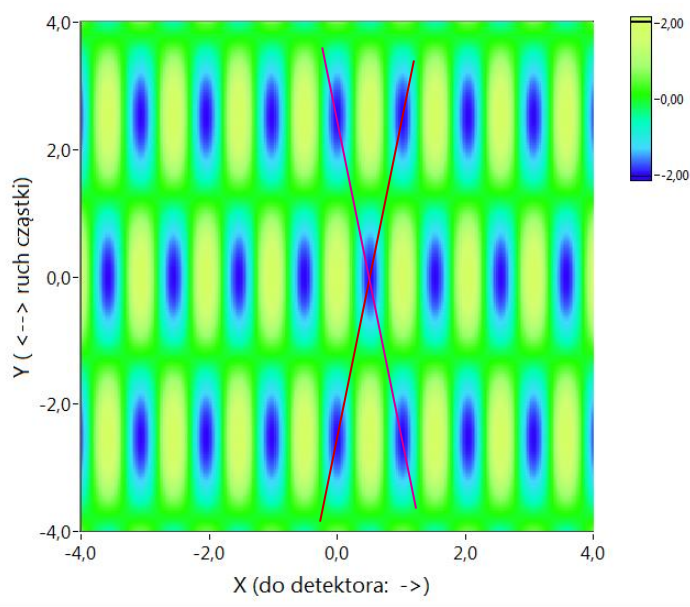
Rysunek 2: Model prążkowy - ogólna konfiguracja instrumentu



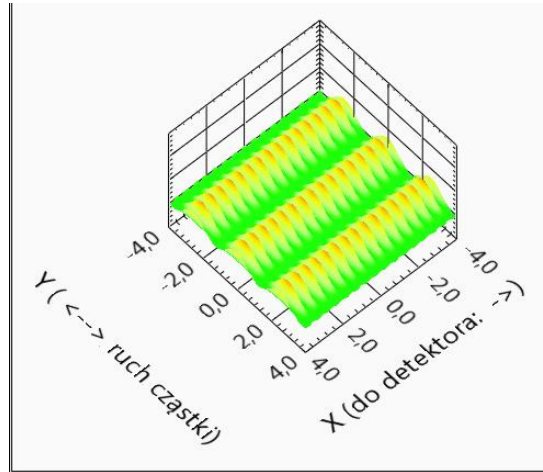
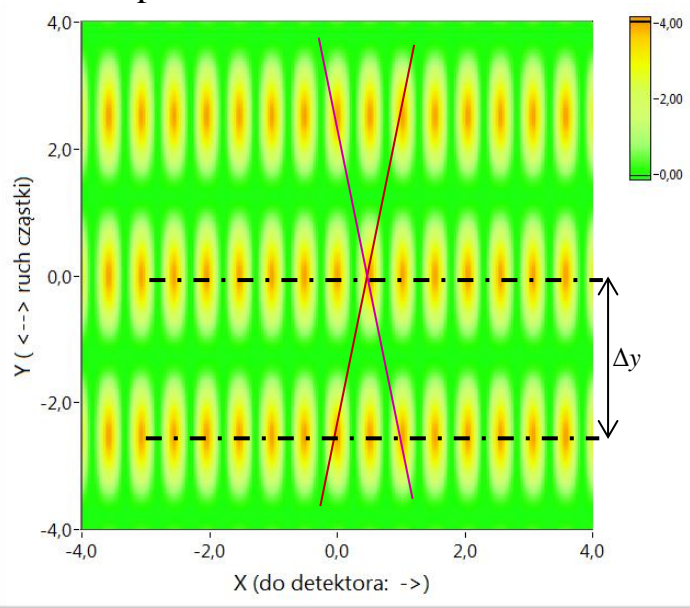
Fala #1 – pole E_1



Fala #2 – pole E_2

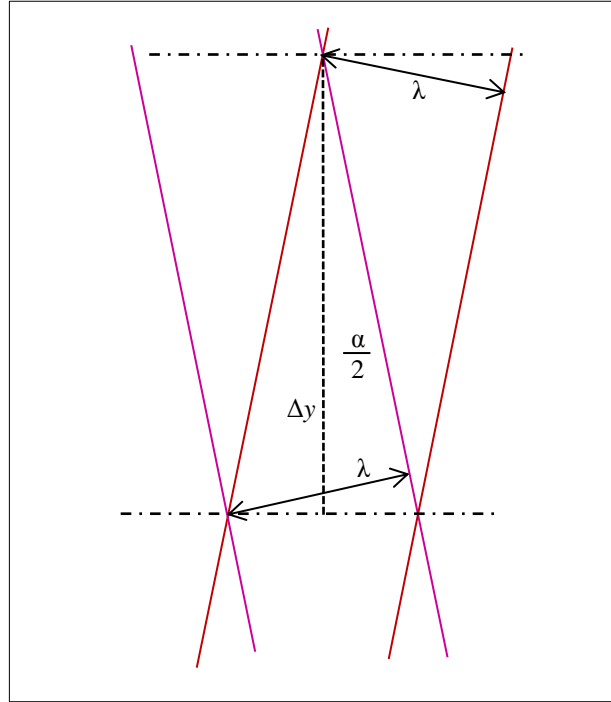


Suma amplitud fal: $E_1 + E_2$



Natężenie światła $\approx (E_1 + E_2)^2$

Rysunek 3: Model prążkowy - symulacje numeryczne (skala X i Y w jednostkach długości fali, $\alpha = 0.4$ rad)



Rysunek 4: Model prążkowy – szczegóły geometrii pomiaru

Odległość Δy pomiędzy prążkami interferencyjnymi w przecięciu wiązek dana jest przez:

$$\Delta y = \frac{\lambda_0}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Małe poruszające się cząstki rozpraszają światło za każdym razem, gdy przechodzą przez jasny prążek. W wyniku tego można obserwować rozbłyski z częstością proporcjonalną do prędkości i odwrotnie proporcjonalną do odległości między prążkami.

$$f_D = \frac{v}{\Delta y} = 2 \frac{v}{\lambda_0} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Jest to dokładnie to samo wyrażenie, jakie otrzymaliśmy poprzednio dla przesunięcia dopplerowskiego.

3. Opis układu doświadczalnego:

Schemat układu doświadczalnego do pomiarów prędkości przepływu pokazany jest na *Rysunku 1*. Monochromatyczna wiązka wychodząca z lasera pada na dzielnik wiązki, którego rolę pełni stolik optyczny z układem zwierciadeł. Następnie równoległe wiązki padają na soczewkę i są skupione w punkcie, w którym znajduje się badany obiekt. Kierunek wektora prędkości cząstki jest w tym układzie w płaszczyźnie kąta a zawartego między wiązkami. Światło rozproszone przez cząstkę jest rejestrowane przez fotodetektor; w tym przypadku fotodiodę. Sygnał elektryczny następnie przesyłany jest do przystawki oscyloskopowej, stamtąd transferowany do komputera, który dokonuje szybkiej analizy fourierowskiej (FFT).

4. Wykonanie ćwiczenia:

4.1. Pomiar prędkości tarczy obrotowej przy wykorzystaniu szybkiej transformaty Fouriera (FFT):

Zestawić układ zgodnie ze *Rysunkiem 1*

Włączyć zasilanie fotodiody i silniczka. Włączyć zasilanie lasera. Ustawić układ tak, aby punkt przecięcia wiązek wypadł na powierzchni krążka w ten sposób, aby wektor prędkości był prostopadły do prążków interferencyjnych. Zwrócić uwagę na właściwy dobór częstości próbkowania (tw. Nyquist'a)

4.2. Wyznaczanie zależności odległości padającej wiązki od środka tarczy.

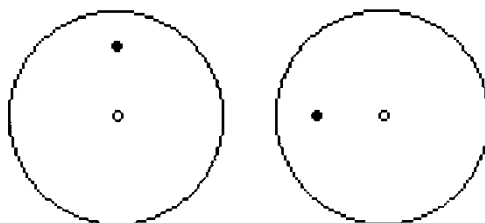
Przeprowadzić pomiary najbardziej dokładną metodą dla różnych odległości r plamki od środka tarczy. Wyniki przedstawić na wykresie. Przeprowadzić regresję liniową. Z badać przyczynę b we wzorze $y=ax+b$ prostej na jej kształt. Przeprowadzić dyskusję błędów i sprawdzić czy prosta opisana $y=ax$ jest wystarczająco dokładna.

4.3. Pomiar referencyjny

Zmierzyć prędkość obrotową tarczy bezpośrednio, za pomocą stopera

4.5. Obserwacje.

Zaobserwować różnicę sygnału dla położzeń plamki przedstawionych poniżej:



Przedyskutować wyniki obserwacji.

5. Opracowanie wyników.

Dane otrzymane należy zebrać w tabelę; wydrukować kilka widm i przebiegów z komputera. Porównać wyniki pomiarów prędkości za pomocą metody optycznej z wyznaczoną z prędkości obrotowej tarczy.

Przeprowadzić dyskusję niepewności pomiarowych. Omówić obserwacje.

8. Literatura.

1. A. Dubik *Zastosowanie laserów*.
2. *Zastosowanie laserów w technice pomiarowej*. wyd. Warszawskie centrum studenckiego ruchu naukowego.
3. M. Węclaś *Anemometria laserowa LDA w badaniach silników spalinowych*.
4. Strony WWW dotyczące LDA (Laser Doppler Anemometry) i LDV (Laser Doppler Velocimetry).