

Siła odśrodkowa

1. Wymagania do ćwiczenia:

1. Ruch po okręgu
2. Siła dośrodkowa, siła odśrodkowa, siły bezwładności
3. Zasady dynamiki w układach inercjalnych i nieinercjalnych

Literatura:

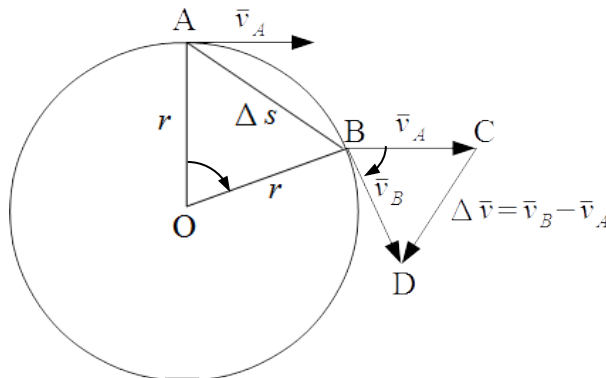
1. S. Szczeniowski: Fizyka doświadczalna, t.1,
2. R. Resnick, D. Halliday, fizyka, t.1.

2. Wprowadzenie do tematyki ćwiczenia:

Siła odśrodkowa jest rodzajem siły bezwładności, pojawiającej się w układzie poruszającym się ruchem krzywoliniowym względem układu inercjalnego. Jest to siła występująca jedynie w układzie nieinercjalnym. Najczęściej siła odśrodkowa rozważana jest dla ciał obracających się względem osi nieruchomej w pewnym układzie inercjalnym. Takie ciało stanowi naturalną bazę do wprowadzenia obracającego się układu odniesienia, który jest nieinercjalny.

Jeżeli z takiego układu odniesienia obserwujemy jakies ciało nieruchome względem tego układu, to dla tego ciała wartość siły odśrodkowej jest równa wartości siły dośrodkowej. W rezultacie opisy ruchu ciała obserwowanego z układu inercjalnego i nieinercjalnego są sobie równoważne. W przypadku ciała opartego na obracającym się podłożu, siłą dośrodkową jest siła tarcia pomiędzy ciałem i podłożem. Z kolei dla ciała wirującego na nici siłą dośrodkową jest siła naciągu nici.

Na poniższym rysunku przedstawiono schemat służący wyprowadzeniu wzoru na przyspieszenie dośrodkowe:



Rys. 1. Punkt materialny porusza się po okręgu ze stałą prędkością o wartości v .

W punktach A i B odłożone zostały wektory prędkości punktu z wykorzystaniem przesunięcia równoległego wektora v_A . Różnica wektorów prędkości w punktach A i B została oznaczona jako

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$$

Z podobieństwa obu utworzonych tak trójkątów równoramiennych wynika, że kąty AOB oraz CBD są sobie równe, a zatem ma miejsce proporcja:

$$\frac{OA}{AB} = \frac{BC}{CD}$$

Po wstawieniu oznaczeń boków trójkątów z rysunku 1), otrzymujemy związek

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta s}{r}$$

Dzieląc go obustronnie przez przyrost czasu Δt i dokonując przejścia granicznego

$$\Delta t \rightarrow 0$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow a$$

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} \rightarrow v$$

dostajemy wzór na wartość przyspieszenia dośrodkowego

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

W przypadku nieskończenie małych przesunięć, kierunek wektora tego przyspieszenia będzie zgodny z promieniem okręgu, a zwrot do środka okręgu.

Zgodnie z drugą zasadą dynamiki wartość przyspieszenia po przemnożeniu przez masę ciała daje wartość siły dośrodkowej, działającej na punkt materialny w ruchu po okręgu:

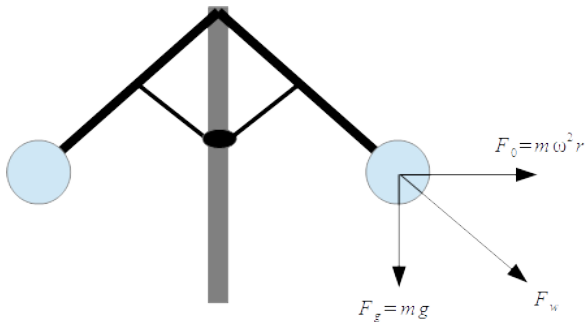
$$F_o = \frac{mv^2}{r} \quad (2)$$

Jednym z możliwych sposobów przedstawienia tego wzoru jest wykorzystanie związku pomiędzy prędkością liniową i kątową w ruchu po okręgu, który prowadzi do formuły:

$$F_o = m\omega^2 r \quad (3)$$

gdzie ω jest prędkością kątową daną wzorem

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$



Rys. 2. Schemat układu do wyznaczania siły odśrodkowej.

Do demonstracji zależności pomiędzy siłą odśrodkową bezwładności i siłą ciężkości można wykorzystać wirówkę, której schemat zamieszczono na Rys. 2. Dwie kule wykonują ruch obrotowy dookoła pionowej osi. Tangens kąta α nachylenia jednego z ramion wirówki do tej osi jest równy stosunkowi wartości siły odśrodkowej do siły

grawitacji działającej na kulę. A zatem wzór na wartość siły odśrodkowej bezwładności przyjmuje postać:

$$F_o = mg \operatorname{tg} \alpha$$

Analiza drugiej zasady dynamiki dla układów nieinercjalnych prowadzi do następującej postaci wektorowej wzoru na siłę odśrodkową bezwładności:

$$\vec{F}_o = -m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

gdzie r jest wartością składowej wektora wodzącego prostopadłej do osi obrotu. Po skorzystaniu z równania na podwójny iloczyn wektorowy, otrzymujemy znaną postać wzoru na siłę odśrodkową:

$$\vec{F}_o = m\omega^2\vec{r}$$

Można zauważyć, że wektor siły odśrodkowej bezwładności jest także prostopadły do osi obrotu i tak jak wektor wodzący, zwrócony jest od tej osi.

3. Metodologia wykonania pomiarów

Ćwiczenie polega na pomiarze wartości siły odśrodkowej z wykorzystaniem pomiaru masy ciała, częstotliwości obrotu ciała wokół pionowej osi oraz odległości środka masy ciała od osi obrotu. Pomiar może być dokonany za pomocą wagi, stopera oraz suwmiarki. W zestawie pomiarowym urządzenia do pomiaru siły odśrodkowej elementem pomiarowym jest wózek jezdny, zaś do pomiaru częstości obrotu wykorzystywana jest znajdująca się w zestawie fotobramka z licznikiem.

Urządzenie umożliwia też bezpośredni odczyt odległości wirującego ciała od osi obrotu. W celu dokonania pomiaru należy odczytać czas jednego obrotu układu oraz odległość odważnika od osi obrotu. W przypadku pomiarów dokonywanych za pomocą licznika obrotów, należy pomiar wykonany przez ustalony czas (np. 10 sekund) podzielić przez odczytaną z licznika liczbę obrotów. Pomiar należy wykonać dla trzech różnych odważników, dokonując po 10 pomiarów dla każdego z nich. Wyniki pomiarów oraz obliczeń umieszczamy w tabeli. Do obliczeń wartości siły odśrodkowej należy wykorzystać uśrednione wartości pomiarów z każdej serii pomiarowej.

Na wykresach należy przedstawić zależność obliczonej siły odśrodkowej w funkcji odległości ciała od osi obrotu oraz zależność siły odśrodkowej od częstości kołowej obrotu dla ciał o różnych masach.

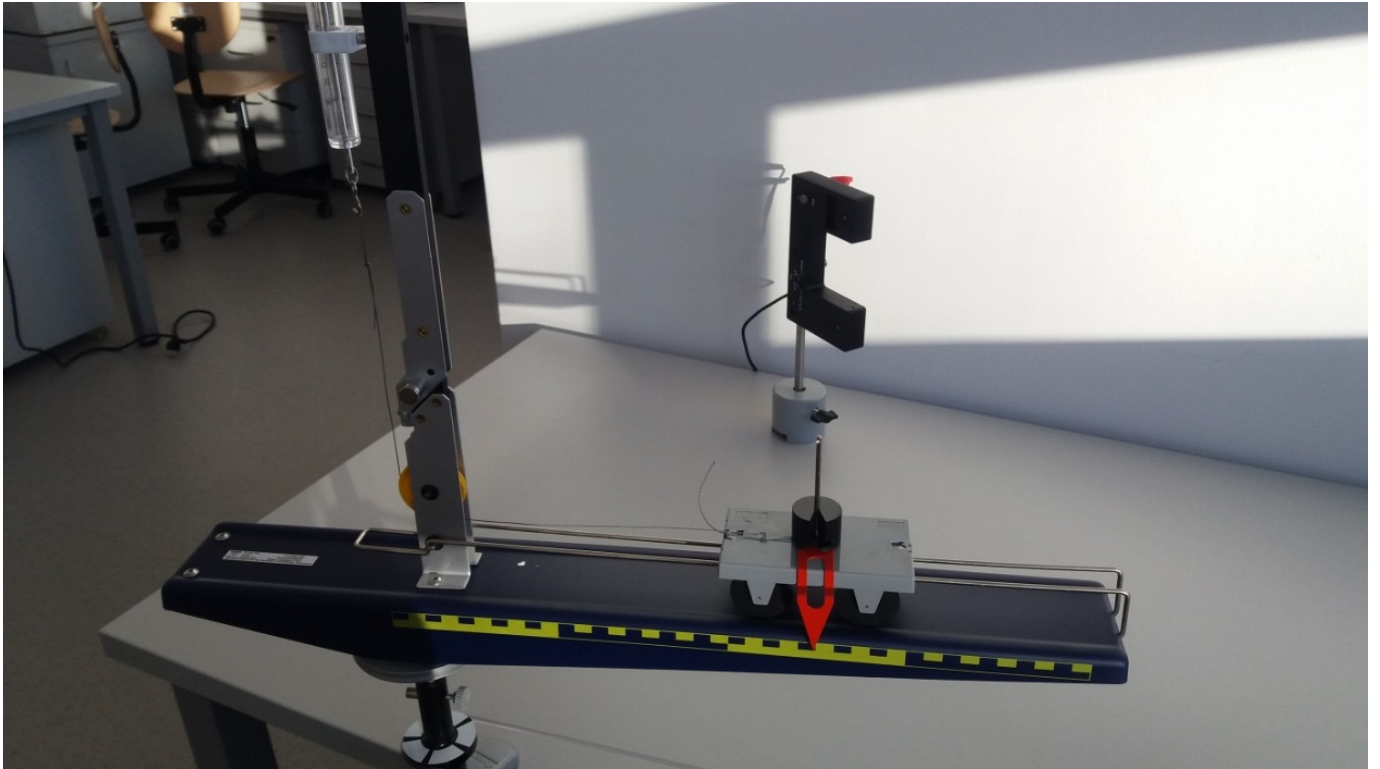
Na wykresach należy nanieść prostokąty błędów pomiarowych. W podsumowaniu należy przedyskutować otrzymane zależności pod kątem zgodności ze wzorem na siłę odśrodkową.

3.1. Schemat przyrządu pomiarowego:

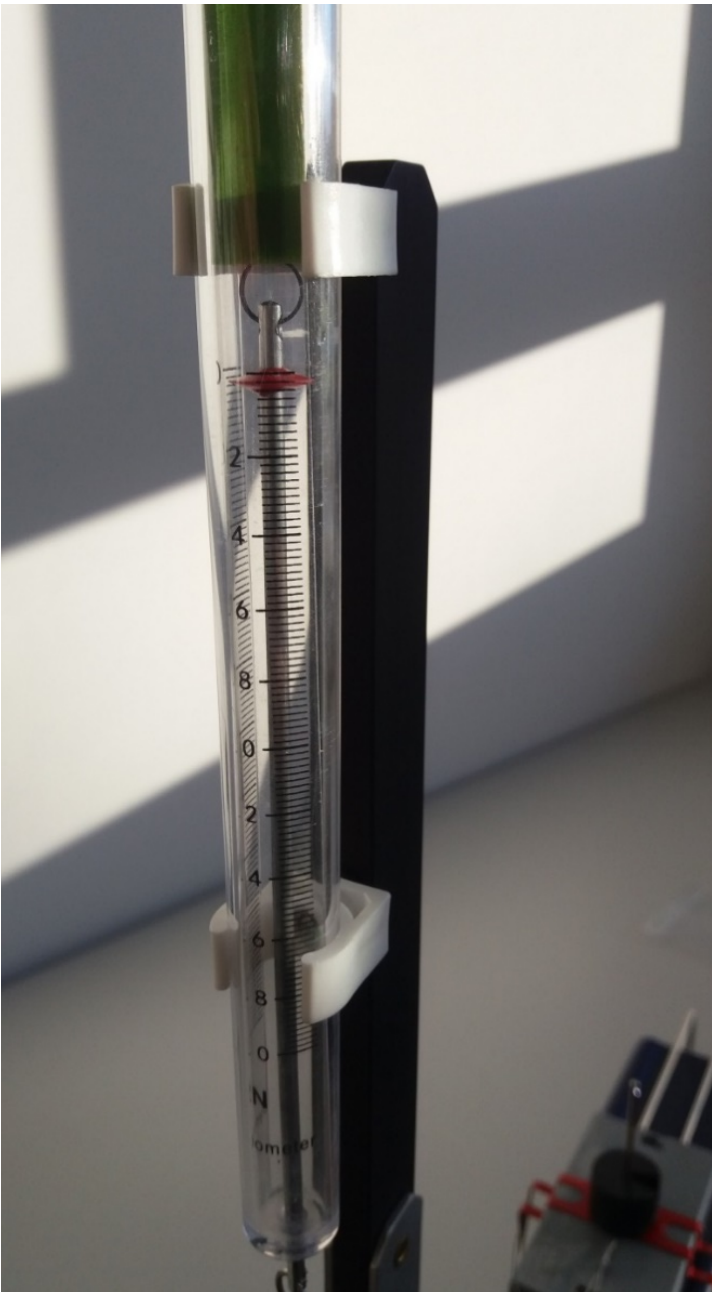
Na prowadnicy znajduje się ruchomy wózek, mogący przesuwać się wzdłuż toru o długości 40 cm (zdj.1). Tor oznaczony jest podziałką z dokładnością do 1cm. Do wózka przymocowana jest iglica, na którą nakłada się ciężarki o znanej masie. Za pomocą żyłki i kołowrotka, znajdującego się na osi przyrządu, wózek połączony jest z siłomierzem. Siłomierz jest umocowany w górnej części pionowej listwy znajdującej się na osi przyrządu (zdj. 2). Cały przyrząd zamocowany jest uchwytem do podłoża. Prowadnica może się obracać. Dodatkowym elementem przyrządu jest elektroniczny miernik czasu z fotokomórką, wyprofilowany tak by obracająca się prowadnica przecinała sygnał z fotokomórki (zdj. 3). Umożliwia to fotokomórce pomiar odstępu czasu pomiędzy dwoma kolejnymi przejściami prowadnicy przez fotokomórkę, czyli pozwala zmierzyć okres obrotu prowadnicy. Wynik pomiaru czasu przedstawiany jest na elektronicznym wyświetlaczu miernika.

Do uruchomienia przyrządu służy zasilacz zaopatrzony w pokrętła regulacji częstotliwości i kierunku obrotu (zdj. 4). Umożliwia on płynną zmianę częstotliwości obrotu prowadnicy. Po uruchomieniu przyrządu, prowadnica zaczyna wykonywać ruch obrotowy dookoła pionowej osi. Powoduje to powstanie

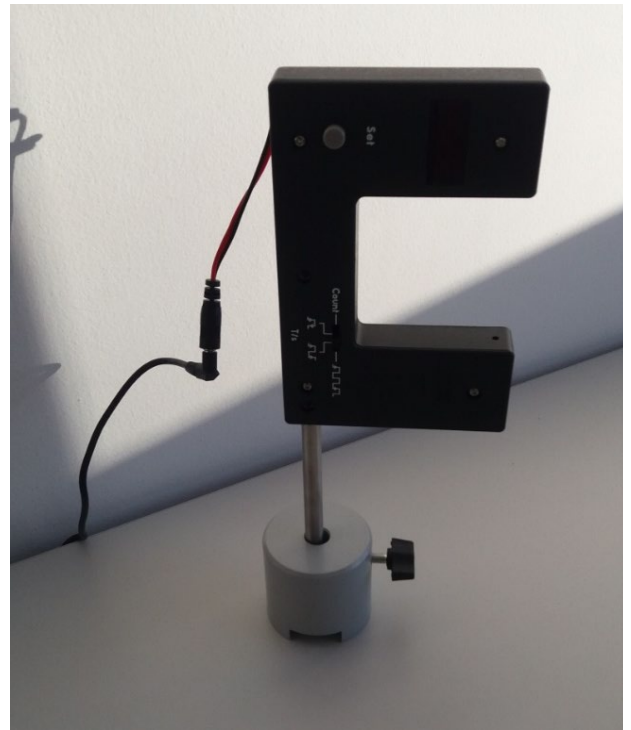
siły odśrodkowej bezwładności w nieinercyjnym układzie odniesienia, nieruchomym względem prowadnicy. Wózek z ciężarkiem, znajdujący się w korycie prowadnicy przesuwa się w wyniku jej obrotu, oddalając się od osi obrotu. Ten efekt ma miejsce aż do zrównoważenia siły odśrodkowej bezwładności przez siłę dośrodkową zapewnianą naciągiem sprężyny w dynamometrze.



Zdj.1. Zestaw pomiarowy



Zdj. 2. Dynamometr do odczytu wartości siły odśrodkowej



Zdj. 3. Fotobramka



Zdj. 4. Układ do regulacji prędkości obrotowej

3.2. Czynności pomiarowe:

1. Uruchomić przyrząd, ustawiając pokrętkiem częstotliwość obrotów. Należy zacząć od niewielkiej częstotliwości (poniżej 20 obr/min).
2. Odczytać wartość siły na pionowym dynamometrze. Odczyt siły odśrodkowej dokonywany jest na wyskalowanej podziałce dynamometru. Zanotować wynik odczytu w tabelce pomiarowej.
3. Odczytać wartość promienia toru ciała w jego ruchu obrotowym. Zanotować wynik odczytu w tabelce pomiarowej.
4. Uruchomić na przyrządzie miernik do elektronicznego pomiaru czasu.
5. Wykonać 10-krotny pomiar czasu pełnego obrotu, restartując miernik ręcznie po każdym obrocie ciała. Zanotować wyniki w tabelce pomiarowej.

6. Powtórzyć pomiary dla dwóch innych ciężarków, odczytując i notując w tabelce pomiarowej wartości ich mas.
7. Powtórzyć pomiary z punktów od 1 do 6 dla dwóch innych częstotliwości obrotów.

Tabela pomiarowa

Lp.	Masa ciężarka m[kg]	Promień toru r[m]	Okres obrotu T[s]	Siła odśrodkowa F[N]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

4. Opracowanie wyników i obliczenia:

1. Dla każdego przypadku obliczyć prędkość kątową ze wzoru (4) oraz wartość siły odśrodkowej ze wzoru (3).
2. Przedstawić na wykresach zależności siły odśrodkowej od promienia oraz częstości kołowej obrotu dla trzech mas ciężarków.
3. Obliczyć metodą typu B niepewność $u(T)$ pomiaru okresu obrotu, niepewność $u(r)$ pomiaru promienia oraz niepewność $u(F_o)$ pomiaru siły. Masę przyjąć jako dokładną.
4. Dla każdego przypadku obliczyć niepewność częstości $u(\omega)$ metodą propagacji niepewności bazując na wzorze (4). Dzięki tej niepewności oraz niepewności promienia $u(r)$ obliczyć w każdym przypadku niepewność obliczonej siły odśrodkowej $u(F_{obl})$ metodą propagacji niepewności bazując na wzorze (3).
5. Poprawnie porównać wartości siły odśrodkowej otrzymane metodą pomiarów, F_o , i obliczeń, F_{obl} , dla pięciu wybranych wartości promienia i częstości. Porównać wynik obliczonej siły z wartością odczytaną na dynamometrze. Zapisać różnice dla pięciu wybranych wartości promienia
6. **Uwaga:** poprawnego porównania dwóch wielkości dokonuje się za pomocą ich niepewności.
7. Nanieść na te same wykresy wyniki pomiarów siły odśrodkowej, uwzględniając niepewności pomiarowe.
8. Porównać wartości siły odśrodkowej otrzymane dla trzech wybranych wartości promienia oraz częstości obrotu.