



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA AUTOMTYKI

Modelowanie układów fizycznych i biologicznych

Podwójne wahadło

Double pendulum

Autor:

Kierunek studiów:

Opiekun pracy:

Żaneta Błaszczuk, Rafał Kozik, Filip Kubicz, Jakub Nowak, Jakub Porębski

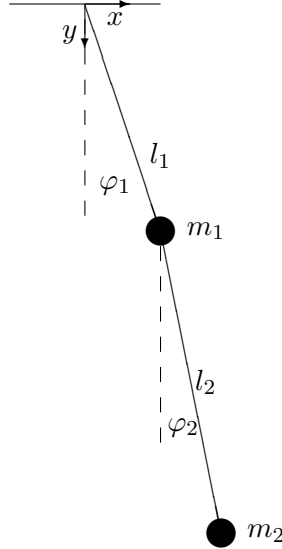
Automatyka i Robotyka

dr inż. Ireneusz Wochlik

Kraków, 2014

1. Teoria

Wahadło podwójne jest to wahadło matematyczne zawieszone na drugim wahadle matematycznym. Jego schemat pokazuje rys. 1. Wahadło opisuje 5 parametrów masy m_1 i m_2 , długości l_1 i l_2 oraz przyspieszenie



Rysunek 1: Schemat wahadła

ziemskie g . Można je zmniejszyć ich ilość podstawiając:

$$A = \frac{m_1}{m_2} \quad B = \frac{l_2}{l_1} \quad C = \frac{g}{l_1} \quad (1)$$

Stan wahadła opisują cztery parametry: kąty φ_1 i φ_2 oraz prędkości kątowe ω_1 i ω_2 . Ruch opisuje układ czterech równań różniczkowych:

$$\dot{\varphi}_1 = \omega_1 \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_1 = - \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_2)(B\omega_2^2 + \omega_1^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) + C((A + 1)\sin(\varphi_1) - \sin(\varphi_2)\cos(\varphi_1 - \varphi_2))}{A + \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (3)$$

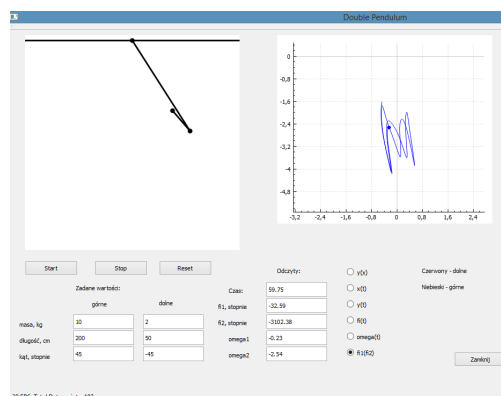
$$\dot{\varphi}_2 = \omega_2 \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{(A + 1)(\omega_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - C \sin(\varphi_2)) + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)((B\omega_2^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)) + C(A + 1)\sin(\varphi_1))}{B(A + \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2))} \quad (5)$$

W modelu nie uwzględniono tarcia.

2. Implementacja

Równania zostały rozwiązane numerycznie za pomocą metody Rungego-Kutty czwartego rzędu która została zaimplementowana w języku c++. Wyniki zostały zapisane do pliku tekstowego, w każdej linii oddzielone spacjami: czas od początku symulacji, kąty φ_1 , φ_2 oraz prędkości kątowe ω_1 i ω_2 . Wykresy zostały przygotowane w programie gnuplot. Powstał także program przedstawiający ruch wahadła napisany z wykorzystaniem biblioteki QT. Wygląd programu pokazuje rys. 2. Kody źródłowe przygotowanego oprogramowania znajdują się w repozytorium pod adresem www.github.com/Qbicz/MUFB.

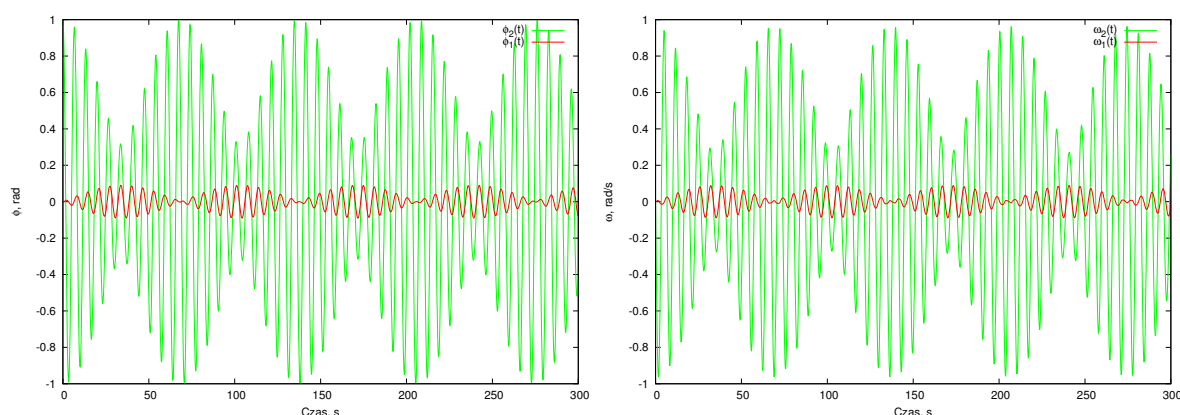


Rysunek 2: Graficzna symulacja ruchu wahadła.

3. Wyniki

Symulacja dla parametrów $A = 100$, $B = 1$, $C = 1$ oraz stanu w chwili $t_0 = 0$ $\varphi_1(0) = 0$, $\varphi_2(0) = 1$, $\omega_1(0) = 0$ i $\omega_2(0) = 0$. Symulacja trwała 300 sekund z krokiem co 0,001 sekundy.

Rys. 3 przedstawia wartości kątów φ_1 , φ_2 , ω_1 oraz ω_2 w funkcji czasu. Dla tak dobranych parametrów powstają dudnienia. Rys. 3 przedstawia trajektorię ruchu wahadła narysowaną w przestrzeni φ_1 , φ_2 . Dla

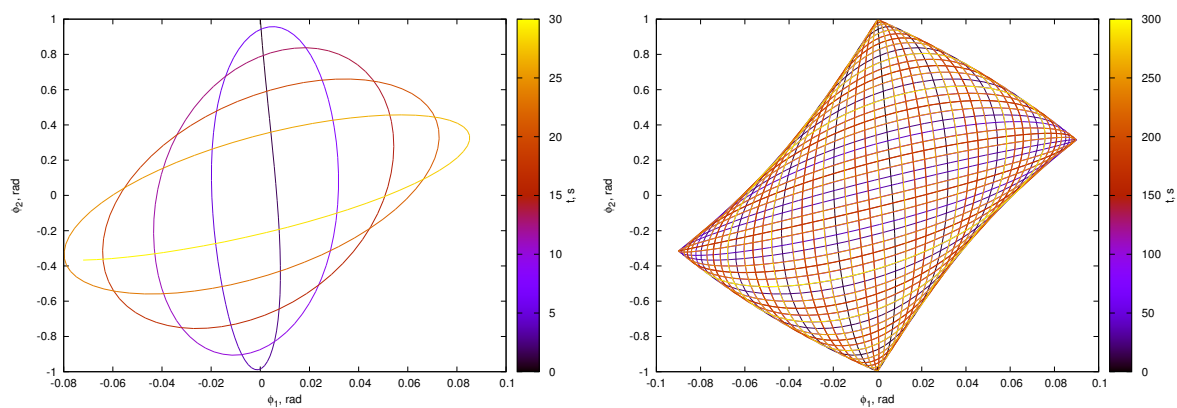


Rysunek 3: Kąty oraz prędkości kątowe w funkcji czasu.

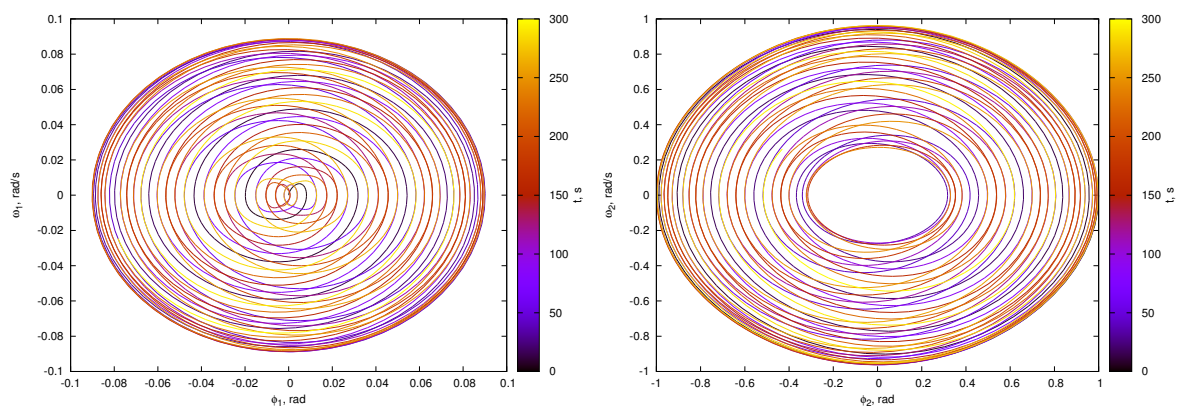
300 sekund nie da się zaobserwować żadnej regularności w ruchu wahadła. Rys. 3 przedstawia trajektorie w przestrzeni fazowej: wykresy prędkości kątowej w funkcji wartości kąta.

4. Bibliografia

1. Wróblewski J. praca licencjacka "Wahadło podwójne" Warszawa 2011
2. Dudek-Dyduch E., Wąs J., Dutkiewicz L., Grobel-Dębska K., Gudowski B. "Metody numeryczne wybrane zagadnienia" Wydawnictwo AGH Kraków 2011



Rysunek 4: Trajektoria w przestrzeni φ_1, φ_2 a) dla pierwszych 30 sekund i b) dla 300 sekund.



Rysunek 5: Trajektoria w przestrzeni fazowej.