

SISTEM ÎNCORPORAT DE MĂSURARE ȘI CONTROL AL AMPLITUDINII PENDULULUI FOUCAULT

EMBEDDED FOUCAULT'S PENDULUM AMPLITUDE MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEM

CZU: 004.31; 53.05; 53.08

<https://doi.org/10.56329/1810-7087.22.2.11>



EUGENIU MUNTEANU,
DOCTORAND, ASISTENT UNIVERSITAR,
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN MOLDOVA
[HTTPS://ORCID.ORG/ 0000-0003-0388-9127](https://orcid.org/0000-0003-0388-9127)

ABSTRACT

This article deals with the problem of measuring the amplitude of the Foucault's pendulum. In this context, the applied methods and procedures are first described, after which the structure of the embedded system for measuring and controlling the amplitude of the Foucault's pendulum is presented. It is mentioned that in order to provide planetary astronomical measurements, the architecture of the measurement and control system must fit into the edge-to-cloud continuous computing paradigm. For this purpose, the pendulum must be kept in oscillation mode, without interfering with natural phenomena affecting the pendulum.

Keywords: *Foucault's pendulum; embedded system; laser; phototransistor; Coriolis force.*

REZUMAT

În acest articol este abordată problematica de măsurare a amplitudinii pentru Pendulul Foucault. În acest context, mai întâi sunt descrise metodele și procedurile aplicate, după care este prezentată structura unui sistem încorporat de măsurare și control al amplitudinii pendulului Foucault. Se menționează că, pentru a asigura măsurări astronomice planetare, arhitectura sistemului de măsurare și control trebuie să se încadreze în paradigma calculului continuu de la margine la cloud. Cu acest scop, pendulul trebuie să fie menținut în regim de oscilație fără ca să interfereze cu fenomenele naturale care acționează asupra pendulului.

Cuvinte-cheie: *Pendulul Foucault; sistem încorporat; laser; fototranzistor; forță Coriolis.*

Introducere

Pendulul Foucault inițial a fost utilizat pentru a demonstra că pământul se rotește în jurul axei sale. Cu ajutorul lui, pot fi monitorizate și alte fenomene astronomice a căror monitorizare necesită foarte mult timp. Dar, un impediment în acest sens este faptul că, în mod natural, amplitudinea pendulului se micșorează până la oprirea lui totală. Pentru ca un pendul să mențină o valoare constantă a amplitudinii, este necesar ca oscilațiile acestuia să fie armonice, într-un sistem ideal, în care nu sunt pierderi de energie. Prezența aerului în mediul în care oscilează pendulul, oscilațiile cărui sunt armonice, este factorul determinant în atenuarea amplitudinii. Pentru a soluționa problema atenuării amplitudinii, s-a propus un sistem bazat pe principiul calculului de margine. Sistemul a fost elaborat pentru a măsura regimul de lucru și a menține amplitudinea Pendulului Foucault instalat în incinta UTM [1][2].

Metodele și procedurile aplicate

Deoarece Pendulul Foucault oscilează în condiții reale, în care sunt prezenți mai mulți factori externi care duc la atenuarea amplitudinii, să presupunem că:

$$\Delta E_{pend} = E_{comp},$$

unde ΔE_{pend} – pierderea energiei pendulului pentru o perioadă, E_{comp} – energia transmisă pendulului într-o perioadă pentru a compensa pierderile.

În astfel de condiții pendulul își va menține amplitudinea dorită [Fig. 1].

În cazul Pendulului Foucault amplasat în condiții aparent normale ar fi o greșeală enormă de mizat pe presupunerea de mai sus, pentru că atât pierderile de energie, cât și sistemul de compensare a energiei depind de o mulțime de factori secundari cum ar fi: amplitudinea curentă, densitatea aerului, temperatura, umiditatea, tensiunea de alimentare pentru sistemul de compensare etc. În cele din urmă, relația este:

$$\Delta E_{pend} \neq E_{comp}.$$

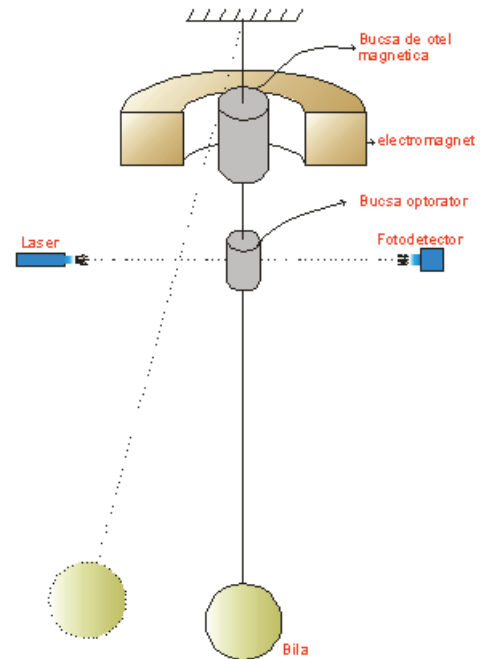


Fig. 1. Metoda de măsurare a amplitudinii

Sursa: Elaborată de autor

Pentru a menține amplitudinea relativ constantă, este necesar ca:

$$\Delta E_{pend} < E_{comp}.$$

Iar atât timp cât $A > A_{max}$ (A – amplitudinea), să deconectăm sistemul de compensare – $E_{comp} = 0$.

Pentru a măsura amplitudinea pendulului, s-a stabilit următoarea metodă. Pe firul de susținere este plasată o bușcă [Fig. 1]. La fiecare oscilație a pendulului bușca amplasată pe fir acoperă fototranzistorul (fotodetectorul). Măsurând durata de timp cât fototranzistorul este închis, care este proporțională cu viteza bușcii, putem măsura și amplitudinea pendulului, deoarece perioada de oscilație, indiferent de viteza bilei, va rămâne constantă.

Viteza bușcii se determină conform expresiei:

$$V = A\omega \cos(\omega t), \quad (1)$$

unde A – amplitudinea, ω – viteza unghiulară.

Deoarece, conform metodei de măsurare, vom determina timpul de trecere prin punctul normal de susținere, unde bila are viteză maximă, com-

ponenta $\cos(\omega t) = 1$, deci [2]:

$$V = A\omega = A \cdot 2\pi/T. \quad (2)$$

La trecerea prin punctul normal de suspensie, viteza buçșei V_{opt} va fi:

$$V_{opt} = d/t, \quad (3)$$

unde: d – diametrul buçșei, t – timpul de trece-re a buçșei prin fascicolul de lumină laser.

Pentru sistemul de măsurare este adevărat raportul:

$$\frac{V}{V_{opt}} = \frac{l \cdot V}{l \cdot V_{opt}} = \frac{l}{L}, \quad (4)$$

unde: l – distanța între punctul de suspensie și fascicolul de lumină; L – lungimea firului de suspensie pentru pendul. Dacă înlocuim (3) în (4):

$$V = \frac{d \cdot l}{t \cdot L} V = \frac{d \cdot l}{t \cdot L}, \quad (5)$$

și obținem formula de calcul a amplitudinii prin înlocuirea (5) în (2):

$$A = \frac{d \cdot L \cdot T}{2\pi \cdot l \cdot t} A = \frac{d \cdot L \cdot T}{2\pi \cdot l \cdot t}. \quad (6)$$

Pentru oscilații armonice, perioada T poate fi calculată:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (7)$$

Datorită forței Coriolis, Pendulul Foucault își schimbă planul de oscilație grație rotirii pământului în jurul axei sale. La poli, Pendulul Foucault își schimbă planul de oscilație cu 360° , la ecuator rămâne neschimbat, iar la latitudinea la care se află pendulul în incinta blocului 1 al UTM – cu aproximativ 261° [3].

Metoda folosită este plasarea în sistem a unui set de perechi *Laser-Fotodetector*. Orientându-ne la t cel mai scurt, vom putea calcula amplitudinea cu o anumită eroare [Fig. 2].

Date fiind obiectivele și funcționalitățile planificate pentru sistemul elaborat, este necesar de menținut amplitudinea la valoarea de 1.2 m, cu o eroare de 3 cm. Este evident faptul că, cu cât numărul de sensori va fi mai mare, cu atât eroarea va fi mai mică. Pentru proiectul elaborat, eroarea relativă a amplitudinii trebuie să se încadreze în 2,5%.

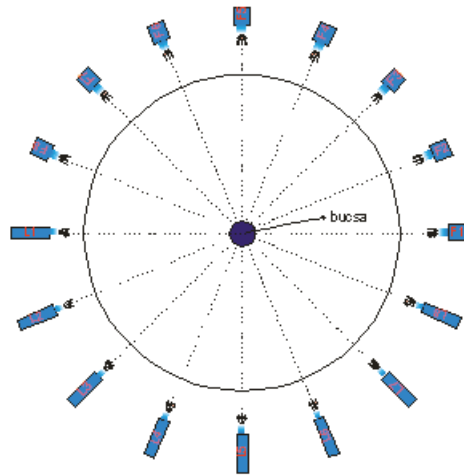


Fig. 2. Schema de plasare a perechilor Laser-Fotodetector

Sursa: Elaborată de autor

Când fascicolul de lumină laser este abătut de la normala planului de oscilație al pendulului, amplitudinea reală a pendulului va fi:

$$A_{real} = K \cdot A_{calculat}. \quad (8)$$

sau :

$$A_{real} = A_{calculat} / \cos \varphi, \quad (9)$$

unde: φ este unghiul de abatere de la normala planului de oscilație. În cazul în care se vor folosi 8 perechi *Laser-Fotodetector*, unghiul între doi senzori va fi de $22,5^\circ$, prin urmare φ_{max} de abatere de la normală a fasciculului de lumină cel mai apropiat va fi $11,25^\circ$ [Fig. 2].

Prin urmare, coeficientul K va fi aproximativ egal cu 1,02, ceea ce va impune o eroare relativă de 2% [Fig. 3].

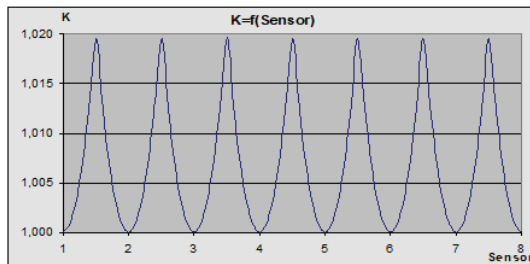


Fig. 3. Schimbarea coeficientului de eroare K

Sursa: Elaborată de autor

Blocurile de măsurare și control reprezintă un set de dispozitive ce ar include microcontrolere ATMELE și are menirea de a ajuta utilizatorul în cadrul ajustării sistemului de măsurare, de a executa funcția de măsurare a timpului de tre-

cere a obturatorului prin intersecția fasciculelor de lumină [Fig. 4]. Dispozitivul de calcul de margine oferă un set de funcționalități de măsurare, comunicare, sincronizare pe întreg sistemul Pendul Foucault.

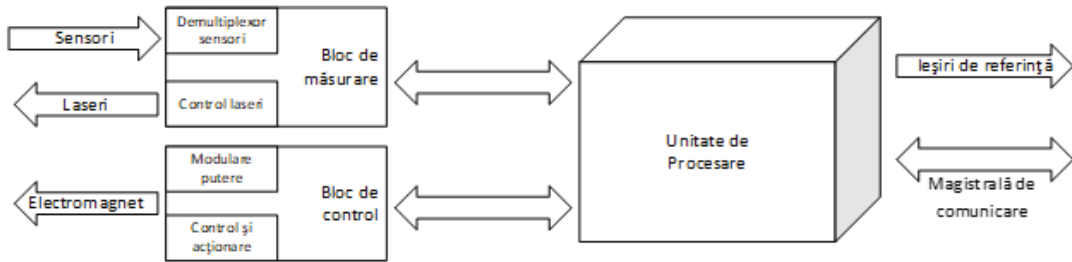


Fig. 4. Structura sistemului de măsurare și control cu Pendulul Foucault

Sursa: Elaborată de autor

Deoarece este necesară conectarea laserelor practic în momentul trecerii obturatorului prin fascicole, putem ridica esențial timpul de viață al laserelor dacă le deconectăm când pendulul este abătut de la poziția normală de suspensie. Situația deconectării laserelor este tratată de senzori analogici acoperirii lor. De aceea funcția suplimentară executată de bloc este măsurarea corectă concomitent cu funcția de ridicare a timpului de viață al laserelor.

Ieșirea de referință reprezintă rezultatul măsurării timpului de trecere a obturatorului prin fascicolul laser, maxim apropiat de normala la planul de oscilație a Pendulului Foucault. În continuare, acest rezultat va fi folosit pentru calcularea aproximativă a amplitudinii.

Magistrala de comunicare este utilizată pentru implementarea unui set de funcții adăugătoare necesare sistemului. Funcția cea mai importantă este ridicarea preciziei de măsurare a amplitudinii. Aceasta se realizează pornind de la faptul că A_{calculat} este utilizat pentru estimarea A_{real} prin calcule. În același timp, măsurările efectuate de către sistem pot fi transmise în Cloud pentru a fi prelucrate, stocate și utilizate ulterior pentru calcule astronomice.

Pentru menținerea oscilațiilor pendulului, a fost utilizat un electromagnet toroidal [Fig.1]. La aplicarea tensiunii continue, bușca magnetică este atrasă de electromagnet, astfel introducând energie mai mare decât totalul de energie pierdută de Pendulul Foucault. Însă, deoarece forța de atragere a bușei de către electromagnet tinde către infinit cu micșorarea distanței [4], se conturează următoarele probleme majore:

- 1) Risc ca bușca magnetică să se lipească de electromagnet deoarece ea este montată pe un fir flexibil;
- 2) În cazul aplicării unei tensiuni insuficiente electromagnetului, există probabilitatea ca energia introdusă în sistem să fie insuficientă pentru a compensa pierderile;
- 3) Deoarece bușca magnetică este montată pe un fir flexibil, în cazul aplicării unei forțe cu caracter aspru, există riscul ca firul să intre într-un regim de oscilații transversale, care poate afecta măsurarea amplitudinii, precum și să sporească riscul de „lipire” a bușei de magnet.

În contextul riscurilor și problemelor expuse mai sus, s-a decis să nu fie aplicată forța bușei magnetice atunci când pendulul se află în imediată apropiere a punctului normal de suspensie, în

regiunea unde se activează regimul de măsurare a amplitudinii [Fig. 5]. Un alt aspect important este aplanarea forței aplicate bucșei în funcție de distanța până la electromagnet. Deoarece s-a decis ca acționarea electromagnetului să fie efectuată prin utilizarea unui modul de modelare a duratei impulsurilor de control (PWM), a fost necesar de identificat și o caracteristică a semnalului de control în funcție de amplitudinea pendulului.

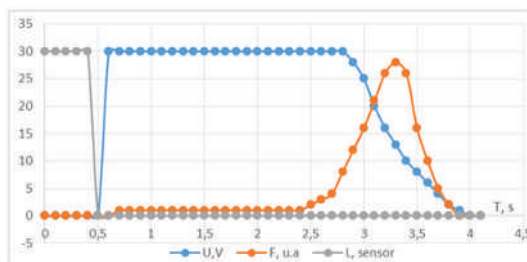


Fig. 5. Caracteristica forței aplicate pendulului

Sursa: Elaborată de autor

În Fig. 5. este prezentat un model al semnalului de control pentru lasere (L), al semnalului de control pentru aplicarea tensiunii electromagnetului (U), rezultanta forței aplicate (F) bucșei pendulului. Însă această forță depinde și de remanența magnetică a electromagnetului care, în condiții reale, sporește riscul de „lipire” a bucșei de magnet, fapt ce a impus necesitatea unei adaptări a caracteristicii semnalului de control [6].

Concluzii

Sistemul elaborat urmează paradigma modernă a calculului la margine și reprezintă o soluție perfectă pentru măsurări și control al amplitudinii Pendulului Foucault. Datele de ieșire din sistem pot fi utilizate pentru analize primare ale forței Coriolis, care acționează asupra pendulu-

lui, iar în acest sens sistemul poate fi conectat la servicii de Cloud prevăzute pentru măsurări astronomice. Sistemul poate detecta oscilațiile transversale ale firului de suspensie, dar, pentru a diminua sau exclude influența acestui fenomen, este necesară reproiectarea părții constructive a pendulului, și anume dimensiunea și plasarea bucșei magnetice. Pendulul elaborat împreună cu sistemul reprezintă o soluție ieșită din comun față de alte pendule din regiune [7], care implementează soluții moderne și are perspective de dezvoltare.

REFERINȚE

- 1) Pendulul Foucault – Orologiu Gravițational: UTM și cercetarea științifică studentescă. In: *Message Universitar*. 2013, nr 1-2, p. 3.
- 2) BAKER, Gregory L., BLCKBURN, James A. *The Pendulum: A Case Study in Physics*. Oxford university press, 2005.
- 3) STOMMEL, Henry M., MOORE, Dennis W. *An Introduction to the Coriolis Force*. Columbia University Press, 1989.
- 4) ЗАБОЛОТНОВ, Ю.М. *Теория колебаний*. Самара, 1999.
- 5) FITZPATRICK, Richard. *Maxwell's Equations and the Principles of Electromagnetism*. Infinity Science Press, 2008.
- 6) HOLMES, D. Grahame, LIPO, Thomas A. *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*. IEEE PRESS Series on Power Engineering. 2003.
- 7) RĂDULESCU, N., HAIMAN, M.H., OLENICI, D. și TIRON, Șt. D. Pendule Foucault în România și Republica Moldova. *Astroclubul Bucuresti*, 29 Sept 2022.