



Universitatea Tehnică a Moldovei

Programul de masterat **Inginerie Electrică**

CONFEȚIONAREA MACHETEI PENDULULUI INVERSAT

Teză de master

Student: Mardare Marcu

Conducător: Dr.conf.univ. Nuca Ilie

Chișinău – 2024

REZUMAT

Teza conține: 50 pagini, 43 ilustrații, 1 tabel, 26 surse bibliografice.

Cuvente cheie: *pendul inversat, servo motor, encoder incremental, control, poziție,regulator PID.*

Obiectul de studiu: Elaborarea machetei pendulului inversat .

Scopul general al tezei: Macheta pendulului inversat elaborată în cadrul tezei de master are drept scop familiarizarea studenților cu un sistem care descrie o problemă a teoriei controlului automat. Acest stand a fost confecționat pentru o dezvoltare continuă a lui și o perfecționare pe viitor. Avantajul acestei machete este că poate fi ușor modificată și de schimbat metoda de control utilizând programarea. Macheta a fost realizată din componente industriale care la fel este un avantaj pentru mediul studentesc, o alternativă de a se familiariza cu sistemele industriale prin studierea acestui stand.

În prima parte a lucrării a fost făcut un studiu asupra fundamentării teoretice a problemei pendulului inversat. S-a descris dinamica pendulului inversat și modelul matematic al acestuia. Dintr-un sistem neliniar s-a obținut modelul matematic liniar prin expansiunea seriilor Taylor. A fost revizuită literatura și cercetările relevante pe subiectul pendulului inversat.

În partea a doua s-au descris două dintre cele mai populare metode de control a pendulului inversat. La aceste două exemple a fost descrise modelele matematice, aduse caracteristicile principale și argumentate importanța tipului de control. S-a implementat metoda regulatorului PID pe macheta pendulului inversat. Au fost luate caracteristicile de pe macheta pendulului inversat.

În ultima parte a fost proiectată macheta pendulului inversat. S-a studiat microcontrolerul S7-200 și soft-ul de programare a acestuia în limbajul LAD. Acționarea electrică realizată de un servomotor cu magneți permanenți pe motor, alimentat și controlat de servoamplificator. Tot în acest capitol a fost descris modul de parametrizare a servoamplificatorului. S-a descris tipul encoderului și cum acesta funcționează. A fost desenată schema electrică și algoritmul de funcționare a machetului pendulului inversat.

Această lucrare a fost elaborată în baza machetei reale a pendulului inversat cu suportul companiei "Vetropack Chișinău S.A".

SUMMARY

The thesis contains: 50 pages, 43 illustrations, 1 tables, 26 bibliographic

Keywords: *inverted pendulum, servo motor, incremental encoder, position control, PID regulator.*

Object of the study: Development of the inverted pendulum model.

General purpose of the thesis: The inverted pendulum model developed as part of the master thesis aims to familiarize students with a system that describes a problem in automatic control theory. This stand was made for a continuous development and a further improvement in the future. The advantage of this layout is that it can be easily modified and the control method changed using programming. The mock-up was made from industrial components which is also an advantage for the student environment, an alternative to become familiar with industrial systems by studying this stand.

In the first part of the paper a study of the theoretical fuzziness of the inverted pendulum problem was made. The dynamics of the inverted pendulum and its mathematical model were described. From a nonlinear system the linear mathematical model was obtained by Taylor series expansion. Relevant literature and research on the subject of the inverted pendulum was reviewed.

In Part 2, two of the most popular methods of controlling the inverted pendulum were described. To these two examples the mathematical models were described, the main characteristics were given and the importance of the control type was argued. The PID controller method was implemented on the inverted pendulum model. The characteristics of the inverted pendulum model were taken.

In the last part the inverted pendulum model was designed. The S7-200 microcontroller and the software for programming the pendulum in the LAD language were studied. The electric drive is realized by a servo motor with permanent magnets on the motor, powered and controlled by the servo amplifier. Also in this chapter the parameterization of the servo amplifier has been described. The type of encoder and how it works has been described. The wiring diagram and the algorithm of operation of the inverted pendulum model was drawn.

This work was elaborated based on the real model of the inverted pendulum with the support of "Vetropack Chişinău S.A".

CUPRINS

INTRODUCERE.....	4
I FUNDAMENTAREA TEORETICĂ.....	6
1.1 Introducere în problema pendulului inversat.....	6
1.2 Dinamica pendulului inversat.....	7
1.3 Modelul matematic liniar.....	9
1.4 Studiul bibliografic și a cercetărilor relevante. Strategii de control aplicate a sistemului pendulului inversat.....	11
Concluzii la capitolul I.....	13
II METODE DE CONTROL A PENDULULUI INVERSAT.....	14
2.1 Regulatorul patratric liniar.....	14
2.1.1 Modelul matematic.....	14
2.1.2 Caracteristicile regulatorului liniar pătratic.....	16
2.1.3 Schița Controlului regulatorului liniar pătratic.....	16
2.2 Controlerul Proporțional Integrator Derivativ (PID).....	17
2.2.1 Introducere în PID reglatoare.....	17
2.2.2 Proiectarea controlerului PID cu două bucle de reglaj.....	19
2.3 Selecția algoritmului de control. Implementarea.....	20
2.4 Integrarea sistemului de control în macheta pendulului inversat.....	23
Concluzii la capitolul II.....	25
III PROIECTAREA MACHETEI PENDULULUI INVERSAT.....	26
3.1 Descrierea generală a machetei.....	26
3.2 Alegerea și descrierea componentelor.....	27
3.2.1 Servomotorul.....	28
3.2.2 Servoamplificatorul.....	30
3.2.3 Encoderul incremental.....	34
3.2.4 Microcontrolerul.....	37
3.2.5 Panoul operatorului.....	41
3.3 Schema electrică și algoritmul de program.....	43
3.4 Confecționarea machetei pendulului inversat.....	44
Concluzii la capitolul III.....	48
CONCLUZII.....	49
BIBLIOGRAFIE.....	50

INTRODUCERE

Pendulul Inversat reprezintă un exemplu caracteristic de obiect neliniar al cărui studiu este de interes academic și are un important interes aplicativ pentru inginerie în general și inginerie aerospațială în particular.

Pendulul inversat este un sistem care are un cărucior programat să echilibreze un pendul (Fig.1) Acest sistem este instabil, deoarece chiar și cea mai mică perturbare ar face ca pendulul să înceapă să cadă. Astfel un control este necesar pentru a menține un pendul echilibrat. Un controler ideal ar păstra pendulul echilibrat cu foarte puține modificări ale unghiului θ sau deplasarea căruciorului, u . Evident unele limite sunt impuse de parametrii actuali ai sistemului precum și de metoda pentru controlul pendulului. Astfel proiectarea unui controler care este aproape ideal este o provocare[1].

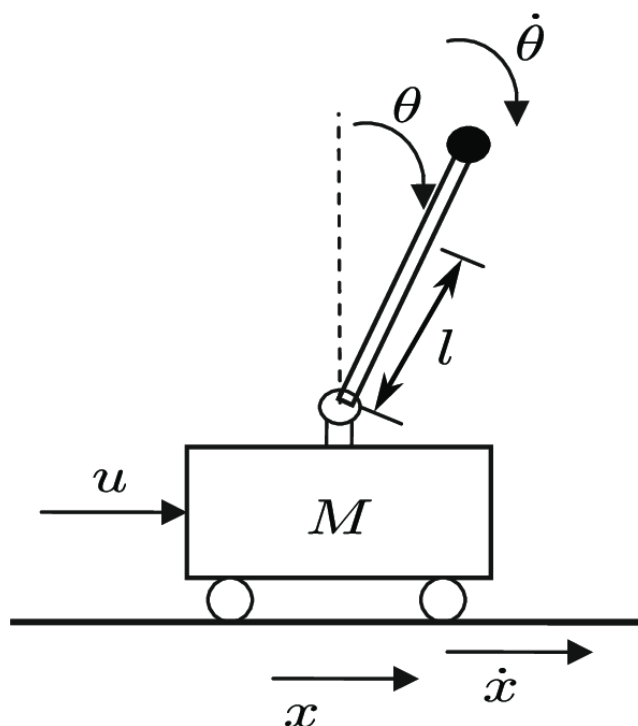


Fig.1.1 Diagrama de bază a unui pendul inversat și forțele ce acționează asupra acestuia.

Problema pendulului inversat este una din problemele de etalon în dinamică și a fost studiată extensiv în literatura teoriei sistemelor. În această lucrare pendulul inversat și sistemul de control al acestuia au fost proiectate, implementate și testate. Pendulul inversat ca sistem în ansamblu are doar o singură intrare care este forța creată de motorul servo și două ieșiri, care sunt unghiul pendulului și poziția căruciorului.

În literatură există numeroase algoritme de control a sistemelor cu pendul inversat și multe rezultate bune. Pendulul este atașat la cărucior prin balama. Căruciorul este proiectat să se deplaseze numai în direcțiile înainte și înapoi pe calea de alunecare. Mișcarea căruciorului

afectează mișcarea pendulului astfel încât pendulul se mișcă fie în sensul acelor de ceasornic, fie în sens invers acelor de ceasornic, în funcție de mișcarea căruciorului. Obiectivul de control al sistemului cu pendul inversat este de a muta căruciorul într-o poziție prestabilită menținând în același timp pendulul echilibrat. Această problemă se numește problema de stabilizare a pendulului inversat.[23]

În această lucrare obiectivul de control este atins sub controlul PID în prezența frecării și perturbațiilor externe.

Scopul lucrării este elaborarea machetei pendulului inversat și implementarea modelului de control PID pe acesta. Obținerea unor caracteristici îmbunătățite a obiectului de control este o prioritate în cercetarea pendulului inversat.

BIBLIOGRAFIE

1. Introducere în problema pendulului inversat.
https://en.wikipedia.org/wiki/Inverted_pendulum ;
2. https://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM08/pdf/am08-complete_28Sep12.pdf;
3. Liniarizarea sistemului https://www.feedback-instruments.com/pdf/brochures/33-005-PCI_datasheet_DigitalPendulum_MATLAB_10_2013.pdf ;
4. Istoria pendulului inversat
<https://web.mit.edu/klund/www/keeling/Pendulum2009.pdf> ;
5. Regulatorul liniar patratric
<https://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds110/wi06/lqr.pdf> ;
6. Modelul matematic LQR
https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/07/mateconf_iceice2016_02064.pdf ;
7. P.Cominos, and N. Munro. "PID controllers: recent tuning methods and design to specification." IEE Proceedings-Control Theory and Applications 149.1 (2002): 46-53;
8. Proiectarea controlerului PID
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/263/5/052007/pdf> ;
9. Selecția algoritmului de control
<https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=InvertedPendulum§ion=ControlPID> ;
10. Parametrizarea PID S7-200
<https://5.imimg.com/data5/SELLER/Doc/2021/3/DT/AK/AA/4080195/siemens-simatic-s7-200-plc.pdf> ;
11. Servomotorul
<https://bever.bg/BG/Documentation/RU/%CC%EE%F2%EE%F0-%F0%E5%E4%F3%EA%F2%EE%F0%FB/%D1%E5%F0%E2%EE%EF%F0%E8%E2%EE%E4%FB%20-%20%CF%F0%E0%EA%F2%E8%EA%E0%20-%2011322853.pdf> ;
12. Servoamplificatorul
https://assets.omron.eu/downloads/manual/ru/v4/i571_accurax_g5_servomotors_drives_with_analogue_pulse_output_users_manual_ru.pdf ;
13. Encoderul
https://res.cloudinary.com/iwh/image/upload/q_auto,g_center/assets/1/26/Autonics_E40_Series_Datasheet.pdf ;

14. Encoderul
https://res.cloudinary.com/iwh/image/upload/q_auto,g_center/assets/1/26/Autonics_E40_Series_Technical_Description.pdf ;
15. Controlerul SIEMENS
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/582/1109582/att_22063/v1/s7200_system_manual_en-US.pdf ;
16. Controlere și automate programabile: Indicații metodice pentru orele practice și de seminar / Vasile Rachier, Vadim Cazac; Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Energetică și Inginerie Electrică, Departamentul Inginerie Electrică. – Chișinău: Tehnica-UTM, 2022. – 95 p. ISBN 978-9975-45-770-5;
17. Panoul operatorului SIEMENS:
https://www.siemens-pro.ru/docs/hmi/06_TP-OP177x_r.pdf ;
18. Mașini electrice și acționări: Indicații metodice pentru lucrări de laborator / Tudor Ciuru; Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Energetică și Inginerie Electrică, Departamentul Inginerie Electrică. – Chișinău: Tehnica-UTM, 2021. – 105 p. ISBN 978-9975-45-717-0;
19. K.J.Aström, and R.M.Murray, “Feedback systems: an introduction for scientists and engineers.” Princeton university press, 2010;
20. “Digital Pendulum: Control Experiments Manual”, East Sussex, U K: Feedback Instruments Ltd., 2007;
21. O.Boubaker, "The inverted pendulum: A fundamental benchmark in control theory and robotics," Education and e-Learning Innovations (ICEELI), 2012 International Conference on, vol., no., pp.1,6, 1-3 July 2012;
22. W.Li; H.Ding; K.Cheng, "An investigation on the design and performance assessment of double-PID and LQR controllers for the inverted pendulum," Control (CONTROL), 2012 UKACC International Conference on, vol., no., pp.190, 196, 3-5 Sept. 2012;
23. Teoria sistemelor și reglare automată: Note de curs / Alexandru Tarlajanu; Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Energetică și Inginerie Electrică, Departamentul Inginerie Electrică. – Chișinău: Tehnica-UTM, 2022. – 141 p. ISBN 978-9975-45-855-9;
24. Controlere și automate programabile: Indicații metodice privind efectuarea lucrărilor de laborator / Vasile Rachier, Vadim Cazac; Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Energetică și Inginerie Electrică, Departamentul Inginerie Electrică. ISBN 978-9975-45-769-9;

25. Real-Time Controlling of Inverted Pendulum by Fuzzy Logic, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics Shenyang, China August 2009;
26. Nuca Ilie. Acționări electrice,
<http://elearning.utm.md/moodle/mod/resource/view.php?id=5718> ;