CONTROLUL OPTIMAL AL UNUI SISTEM DE TRANSPORT INSTABIL PE DOUĂ ROȚI

PROIECT DE DIPLOMĂ

Autor: **Maria MOLDOVAN**

Conducător științific: **Prof. dr. ing. Eva DULF**

|  |  |
| --- | --- |
| DECAN  **Prof.dr.ing. Liviu MICLEA** | Vizat,  DIRECTOR DEPARTAMENT AUTOMATICĂ  **Prof.dr.ing. Honoriu VĂLEAN** |

Autor: **Maria MOLDOVAN**

Controlul optimal al unui sistem instabil pe două roți

1. **Enunţul temei:** *Acest Proiect de diplomă propune o soluție optimală pentru controlul stabilității și a poziției unui sistem de transport instabil pe două roți. Scopul final al proiectului este proiectarea unei structuri de control capabilă să îndeplinească aceste obiective, folosind algoritmul optimal de control Linear Quadratic Regulator. Controllerul obținut astfel va fi implementat în programul de bază al echipamentului real folosind o schemă Simulink, implementată la nivelul mediului de programare MATLAB.*
2. **Conţinutul proiectului:** *Introducere – Context general, Obiective și Specificații, Studiu Bibliografic, Analiză, Proiectare și implementare – Determinarea modelului matematic, Proiectarea structurii de control, Simulare, Implementarea de prototipuri de control în MATLAB/Simulink, Concluzii – Rezultate obținute, Direcții de dezvoltare, Bibliografie, Anexe.*
3. **Locul documentaţiei:** *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Specializarea Informatică Aplicată*
4. **Consultanţi:**
5. **Data emiterii temei:** 1 Noiembrie 2018
6. **Data predării:** 12 Iulie 2019

Semnătura autorului

Semnătura conducătorului științific

**Declaraţie pe proprie răspundere privind**

**autenticitatea proiectului de diplomă**

Subsemnatul(a) Moldovan Maria , legitimat(ă) cu C. I. seria ZV nr. 053415, CNP 2971029081814, autorul lucrării: *Controlul optinal al unui sistem de transport instabil pe două roți* elaborată în vederea susţinerii examenului de finalizare a studiilor de licență la Facultatea de Automatică și Calculatoare, specializarea Automatică și Informatică Aplicată, din cadrul Universităţii Tehnice din Cluj-Napoca, sesiunea Iulie 2019 a anului universitar 2018-2019, declar pe proprie răspundere, că această lucrare este rezultatul propriei activităţi intelectuale, pe baza cercetărilor mele şi pe baza informaţiilor obţinute din surse care au fost citate, în textul lucrării, şi în bibliografie.

Declar, că această lucrare nu conţine porţiuni plagiate, iar sursele bibliografice au fost folosite cu respectarea legislaţiei române şi a convenţiilor internaţionale privind drepturile de autor.

Declar, de asemenea, că această lucrare nu a mai fost prezentată în faţa unei alte comisii de examen de licenţă.

In cazul constatării ulterioare a unor declaraţii false, voi suporta sancţiunile administrative, respectiv, *anularea examenului de licenţă*.

Data Nume, Prenume

Moldovan, Maria

(semnătura)

**SINTEZA**

proiectului de diplomă cu titlul:

Controlul optimal al unui sistem instabil pe două roți

Autor: **Maria MOLDOVAN**

Conducător științific: **Prof. dr. ing. Eva DULF**

1. Cerinţele temei: Se cere proiectarea unei structuri de control optimale care, integrată în programul de commandă al sistemului de transport instabil pe două roți, să fie capabilă să mențină transportorul în poziție de echilibru instabilă verticală și să execute în același timp deplasarea acestuia în linie dreaptă pe o distanță predefinită. De asemenea, se cere atingerea unor performanțe superioare de control prin integrarea acestui controller în algoritmul de programare al transportorului, evidențiate în valorile obținute pentru suprareglaj, timpul de răspuns, eroarea staționară la poziție (precizia de urmărire a referinței date) etc. Structura de reglare obținută trebuie să asigure, prin integrarea în sistem, o capacitate ridictă de rejectare a perturbațiilor exterioare.

2. Soluţii alese: Pentru îndeplinirea cerințelor specificate mai sus, în proiectarea structurii de reglare, s-a ales folosirea algoritmului optimal de control Linear Quadratic Regulator. Metoda de proiectare descrisă de acest algoritm este bine documentată în mediul academic și recunoscută pentru performanțele superioare în controlul sistemelor instabile cu mai multe intrări și mai multe ieșiri. În vederea obținerii unei structuri de control cât mai performante, s-a dispus, de asemenea identificarea modelului sistemului din date experimentale, pentru a dispune de o descriere cât mai bună a comportamentului transportorului. Sistemul de transport instabil pe două roti a fost identificat în spațiul stărilor folosind System Identification Toolbox disponibil la nivelul mediului de dezvoltare MATLAB. Designul structurii de control optimale s-a făcut în MATLAB, pornind de la modelul matamatic determinat.

3. Rezultate obţinute: În urma identificării sistemului de transport instabil pe două roți, s-a obținut un model matamatic instabil în spațiul stărilor, complet observabil și controlabil. Această proprietate a modelului permite începerea procesului de proiectare a structurii optimale de control. Designul controllerului folosind algortimul LQR, a avut ca rezultat obținerea unei matrice de ponderi K. Această matrice reprezintă soluția optimală de control *u* = -K*x* capabilă să minimizeze valoarea indicelui de performanță *J*=.

Ecuația matriceală *u*=-K*x* estimează costul energetic al semnalelor de control. În cadrul ecuației indicelui de performanță, matricele **Q** și **R** determină importanța relativă a erorii (diferența dintre starea dorită și starea obținută) și, respectiv, costul energie de control. Unui sistem de control optimal este un sistem în buclă închisă, cu reacție completă de la stare.

Înainte de implementarea pe echipamentul real, performanțele structurii optimale de control proiectate au fost simulate în mediul MATLAB/Simulink folosind două tipuri de modele: unul liniar și altul neliniar. Această simulare are scopul de a urmări dacă cerințele de control sunt respectate. Rezultatul simulării a arătat performanțe satisfăcătoare de control pentru ambele modele. Structura de reglare poate fi, așadar implementată pe echipamentul real.

4. Testări şi verificări: Testarea controllerului s-a făcut prin intermediul unei scheme de programare Simulink; designul aceastei scheme a fost făcut în accord cu particularitățile de programare ale sistemului de transport instabil pe două roți. Shema de testare a fost apoi convertită în cod C, iar codul rezultat transmis, wireless, plăcii de comandă a transportorului pentru programare. În urma integrării structurii proiectate în algoritmul de comandă al sistemului, s-a putut realiza menținerea transportorului în poziție verticală cu deplasarea lui în linie dreaptă pe o distanță predefinită. Performanțele de reglare au fost, de asemenea, satisfăcătoare.

5. Contribuţii personale: Contribuțiile personale sunt următoarele: proiectarea și executarea experimentului de achiziționare de date, identificarea modelului matematic al sistemului, designul matricelor Q și R pentru obținerea matricei de control optimal K și designul și implementarea experimentului de testare a structurii de control proiectate pe echipamentul real.

6. Surse de documentare: Pentru documentarea acestui proiect de diplomă s-au utilizat cărți si articole academice de specialitate axate pe rezolvarea unor probleme asemănătoare sau care abordează subiecte similare. Un aport important îl are documentația publică, disponibilă online, a funcțiilor de identificare și control MATLAB.

Munca de cercetare depusă pentru dezvoltarea acestei teze de licență a fost rezumată într-un articol științific. Acest articolul a fost acceptat și prezentat în cadrul *Conferinței ACSC 2019*, care a avut loc în data de 28 Iunie 2019, în Cluj-Napoca.

Semnătura autorului

Semnătura conducătorului științific

Cuprins

[1 Introducere 3](#_Toc13748503)

[1.1 Context general 4](#_Toc13748504)

[1.2 Obiective 4](#_Toc13748505)

[1.3 Specificații 6](#_Toc13748506)

[1.3.1 Specificații funcționale 6](#_Toc13748507)

[1.3.2 Specificații non-funcționale 6](#_Toc13748508)

[2 Studiu bibliografic 9](#_Toc13748509)

[3 Analiză, proiectare, implementare 13](#_Toc13748510)

[3.1 Determinarea modelului matematic al sistemului 13](#_Toc13748511)

[3.1.1 Achiziționarea setului de date 15](#_Toc13748512)

[3.1.2 Definirea unui set de modele 19](#_Toc13748513)

[3.1.3 Selectarea modelului potrivit și validarea acestuia 23](#_Toc13748514)

[3.2 Proiectarea structurii de control 28](#_Toc13748515)

[3.3 Simulare 36](#_Toc13748516)

[3.4 Implementarea de prototipuri de control în MATLAB/Simulink 40](#_Toc13748517)

[4 Concluzii 45](#_Toc13748518)

[4.1 Rezultate obținute 45](#_Toc13748519)

[4.2 Direcții de dezvoltare 46](#_Toc13748520)

[5 Bibliografie 49](#_Toc13748521)

[6 Anexa 1. Lucrare științifică 51](#_Toc13748522)

# Introducere

Controlul sistemelor este o ramură foarte importantă a ingineriei, integrată într-o gamă largă de domenii: de la industrie și sisteme de fabricație, la robotică și automotive. La început, cercetarea în acest domeniu era strâns legată de nevoia de automatizare a anumitor procese și sarcini repetitive; recent, însă, echipamentele operate folosind controlul automat au demonstrat performanțe foarte bune de precizie și viteză de execuție în îndeplinirea de sarcini din ce în ce mai complexe, eliminând total sau în mare măsură intervenția factorului uman.

Autonomia de funcționare a roboților, a liniilor de fabricație, a locuințelor, a vehiculelor și a altor echipamente nu mai este ficțiune ci este realitatea. În acest caz, o problemă importantă care se ridică este modalitatea de dezvoltare de sisteme capabile să efecutueze operații cât mai dificile, mai multe și mai imprevizibile, având la dispoziție resurse de calcul limitate. Dacă înainte aplicabilitatea controlului era limitată de capacitatea factorului uman de a înțelege comportamentul unui proces care trebuia controlat, apariția și dezvoltarea sistemelor de calcul moderne a permis, concomitent, posibilitatea de proiectarea de sisteme din ce în ce mai sofisticate și designul și elaborarea de noi algoritmi de control capabili să răspundă noilor cerințe de performanță și complexitate.

În aceste condiții, s-a observat ineficiența și inferioritatea metodelor clasice de control care puteau fi adaptate unei clase reduse de procese (descrise printr-o gamă limitată de expresii matematice). Astfel, cu ajutorul noilor tehnologii, s-a început cercetarea și dezvoltarea de noi metode și algoritmi care să ofere soluții compatibile cu noile schimbări tehnologice. În acest sens, una dintre soluțiile găsite a fost controlul optimal; acesta a fost dezvoltat în jurul problemei plasării polilor în cadrul sistemelor instabile, având scopul de a stabili un echilibru între răspunsul dezirabil al sistemului și energia de control necesară pentru obținerea acestuia. Avantajul major al acestei abordări este obținerea și menținerea răspunsului dorit din partea sistemului folosind structuri de control care solicită o putere de calcul redusă din partea computerului de comandă a ansamblului.

Implementarea unei structuri de reglare în cadrul unui echipament presupune integrarea în algoritmul de programare al sistemului a unor secvențe de cod specifice provenite din ecuații matematice dezvoltate în scopul controlului. Se încearcă, în acest fel, optimizarea procesului de luare de decizii prin exprimarea intrărilor sistemului ca funcție depinzănd de răspunsul real al sistemului relativ la răspunsul dorit din partea acestuia. Se renunță astfel la programarea empirică (bazată pe observare comportamentului echipamentului comandat) în favoarea implementării unor structuri de calcul matematic care oferă o soluție fiabilă de control. Dificultatea de dezvoltare a unor astfel de metode este contrabalansată în cazul acesta de viteaza superioară de procesare oferită, folosind spațiu limitat, precum și de capacitatea algoritmului de a se adapta continuu la schimbările care apar în mediul exterior (perturbații) datorită designului superior.

## Context general

Sistemele autonome au fost, în ultimii ani, din ce în ce mai implicate în activitățile omului. Capacitatea acestora de a efectua sarcini complexe și de a se adapta la medii noi a fost exploatată cu succes într-o varietate foarte mare de domenii: automotive, industrie, locuințe etc. Aceasta a dus la integrarea de roboți și sisteme autonome în noi domenii în care posibilitatea introducerii de astfel de sisteme a fost considerată imposibilă până atunci (un exemplu ar fi domeniul medical). Particularitățile acestor medii au dus la elaborarea de soluții de mobilitate, structură și control. O constrângere importantă este impusă de spațiu în care ansamblu autonom își va desfășura activitatea; pentru a asigura posibilitatea de integrare a structurilor autonome în medii greu accesibile, s-au elaborat roboți cu un număr redus de componente (număr minim de roți, senzori, procesoare etc.) și s-au găsit soluții de asamblare și dispunere optimă a pieselor componente.

Costul adaptării sistemelor autonome la medii în care nu au mai fost utilizate până atunci se reflectă în complexitatea algoritmilor folosiți pentru programare, cât și în complexitatea liniilor de fabricație în care se produc. Astfel, dezvoltarea, fabricarea și mentenanța sistemelor necesită un nivel mai înalt de calificare al persoanelor care participă la procesul de producție și întreținere al acestora.

Sistemul de transport instabil pe două roți este un robot instabil a cărui construcție se bazează pe principul pendulului inversat. Acesta este autonom și dispune de o sursă proprie de energie, ceea ce îi permite deplasarea independentă în mediul înconjurător, fără a necesita alimentarea permanentă de la rețea. Atât structura transportorului cât și numărul și tipul de componente folosite au fost reduse astfel încât să se obțină eficiență maximă în raportul echipamenete de calcul pe suprafață. Transportorul este, însă, prin natura sa, foarte instabil și puternic neliniar.

Roboți și sisteme autonome pe două roți, care au integrat în structura lor și un pendul inversat pot fi cu ușurință folosiți în medii în care spațiul de deplasare este limitat. Așadar, echipamente cu un design asemănător cu cel a sistemului de transport instabil pe două roți pot fi integrate, de exemplu, în spitale (folosiți de obicei pentru transportul de sarcini mici cum ar fi tablete pe care este integrat un sistem inteliget pentru interacțiunea cu pacienții), în depozite (folosiți pentru transportul de sarcini de diferite greutăți între rafturi înguste) și uneori în parcuri și centre comerciale (în care vehiculele obișnuite nu au acces) pentru transportul oamenilor. Acestea sunt doar câteva exemple în care utilizarea și integrarea sistemelor de transport instabile pe două roți a fost făcută cu succes.

## Obiective

Obiectivul principal al acestui proiect de diploma este oferirea unei soluții optime de control la problemele de stabilizarea a sistemului de transport instabil pe două roți în poziție verticală și de deplasare a acestuia pe o distanță predefinită. Utilizarea algoritmilor de control clasic, în cazul echipamentului de fată este ineficientă datorită neliniarității puternice pe care transportorul o manifestă în comportamentului lui. Acest aspect îngreunează procesul de descentralizarea a sistemului care are 2 intrări și 5 ieșiri (Multiple Input, Multiple Output).

Pentru a asigura performanțe cât mai bune de control, precum și o rezistență crescută la perturbații exterioare, a fost ales algoritmul Linear Quadratic Regulator (LQR) pentru proiectarea unei structuri de control avansate, capabilă de satisfacerea tuturor cerințelor de control definite prin specificații. Controllerul obținut prin intermediul acestei metode trebuie să ofere performanțe bune de control atât în timpul simulării cât și în timpul procesului de testare pe echipamentul real.

Implementarea controlului în corpul codului de comandă al transportorului trebuie să se facă prin intermediul unei diagrame Simulink care conține blocuri specifice implementării algoritmilor de control. Diagrama obținută va fi apoi transformată în cod C iar codul transferat pe placa de comandă a sistemului de transport instabil pe două roți. Transferarea codului din mediul MATLAB pentru programarea plăcii de bord este facilitate de către producătorii echipamentului care pun la dispoziția utilizatorilor un protocol de transfer wireless prin intermediul căruia se efectuează comunicarea între transportor și utilizator.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal de control, se definesc următoarele obiective specifice care contribuie la obținerea care trebuie avute în vedere pentru îndeplinirea obiectivului principal:

* Identificarea sistemului de tip Multiple Input, Multiple Output (MIMO) prin experiment:
* proiectarea unui experimentului pentru achiziționarea de date.
* executarea experiemntului și achiziționarea de date, având în vedere caracteristicile și facilitățile de care dispune sistemului de transport instabil pe două roți;
* încadrarea sistemului într-o clasă de sisteme;
* identificarea sistemului ținând cont de clasa de modele de care aparține și de caracteristicile echipamentului real;
* validarea modelului obținut;
* Proiectarea structurii de control folosind algoritmul LQR:
* testarea observabilității și controlabilității sistemului;
* proiectarea structurii de control în buclă închisă;
* designul matricelor Q (matricea de importanță relative a erorii) și R (matricea de cost a energiei de control a intrărilor) în conformitate cu specificațiile de control;
* designul matricei optimale de control;
* validarea corectitudinii rezultatului obținut;
* Simularea în Simulink a comportamentului sistemului în buclă închisă dacă se adaugă controllerul proiectat anterior:
* simularea sistemului în buclă închisă folosind un model liniarizat al sistemului și extragerea performanțelor de control obținute;
* simularea sistemului în buclă închisă folosind un model neliniar al sistemului și extragerea performanțelor de control obținute;
* Testarea și validarea structurii de control proiectate pe echipamentul real:
* proiectarea schemei de control Simulink
* implementarea structurii de control în sistemul real;
* testarea și validarea sistemului de control pe echipamentul real și extragerea performanțelor acestuia;

## Specificații

Acest proiect de diplomă este un proiect de cercetare științifică și are scop academic. În acest sens, proiectul de față poate servi, în viitor, ca punct de plecare pentru cercetări ulterioare în același domeniu. Dezvoltarea acestei lucrări s-a bazat pe munca de cercetare și soluțiile propuse pentru rezolvarea unor probleme similare, însă propune o soluție unică pentru rezolvarea unei probleme intens discutate în domeniul inginerie controlului.

Controlul optimal și performanțele acestuia sunt intens discutate în mediul academic, precum și fiabilitatea sistemelor în care se întrebuințează acest tip de control. Proiectul de față încearcă să prezinte beneficiile utilizării algoritmilor de control optimal în designul controllerelor pentru sisteme cu arhitecturi fizice asemănătoare.

### Specificații funcționale

Specificațiile funcționale ale acestei licențe descriu funcțiile sistemului optimal de control (obținut prin adăugarea în buclă închisă unei structuri optimal de control la sistemul controlat). Prin proiectarea unui sistem de control care respectă specificațiile funcționale, soluția obținută își demonstrează valabilitatea ca punct de plecare în cercetări viitoare.

Aceste specificații funcționale sunt aceleași cu obiectivele specifice prezentate anterior:

* proiectarea unui experiment pentru achiziționarea de date;
* identificarea sistemului pornind de la datele achiziționate în urma executării experimentului;
* validarea modelului matematic obținut prin identificare;
* analiza observabilității și controlabilității sistemului;
* designul matricelor de cost Q și R;
* proiectarea structurii de control optimale;
* validarea structurii de control obținute;
* simularea sistemului de control folosind un model liniar și un model neliniar al transportorului;
* testarea și validarea structurii de reglare pe echipamentul real;

### Specificații non-funcționale

Specificațiile non-funcționale ale proiectului prezentat specifică criteriile care pot fi folosite în evaluarea performanțelor structurii de control proiectate; acestea impuse prin deciziile luate în timpul procesului de proiectare a structurii de reglare și sunt prezentate mai jos:

* *Control*: Structura de control proiectată trebuie să asigure menținerea sistemului de transport instabil în poziție verticală și deplasarea acestuia pe o distanță predefinită (setată de către utilizator).
* *Suprareglajul*: Se urmărește obținerea, prin control, a unor valori ale suprareglajului cât mai mici posibil; totuși, având în vedere particularitățile de construcție ale sistemului de transport instabil pe două roti (neliniaritate și instabilitate) se cere ca suprareglajul să nu depășească valoarea de 40% în reglarea poziției roților în spațiul tridimensional iar valoarea suprareglajului să nu depășească 70% în cazul controlului unghiului de deviație de la axa verticală a pendulului.
* *Timpul de răspuns*: Controllerul proiectat trebuie să fie capabil să corecteze comportamentul neadecvat al sistemul cât mai repede; natura instabilă a transportorului la care se adaugă acțiunea forțelor exterioare asupra pendulului inversat atașat transportorului au însă o influență puternică asupra comportamentului acestuia; din acest motiv, se acceptă un timp maxim de răspuns *tr* = 15 secunde.
* *Eroarea staționară la poziție*: Scopul controlului este obținerea unei erori staționare la poziție cât mai apropiată de zero.
* *Interval de control*: Valorile celor două semnale de control care dispun tensiunea cu care se vor acționa cele două roți conducătoare trebuie să aparțină intervalului [-0.7; 0.7] pentru a se evita astfel arderea motoarelor prin supra-turație.

# Studiu bibliografic

Cercetările științifice în domeniul controlului unui robot instabil pe 2 roți își fundamentează algoritmi în teoria pendulului inversat. Astfel, se folosesc pentru modelare ecuații derivate din legile de mișcare care caracterizează acest sistem. Întrucât există asemănări clare din punct de vedere fizic între robotul instabil și pendulul inversat, această alegere este evidentă. Datorită acestei posibilități, problema modelării este rezolvată și mai rămâne deci de rezolvat doar problema controlului; pentru aceasta, este ales ca scop stabilizarea robotului pe 2 roți, așadar a pendulului, în poziție verticală.

Pentru rezolvarea acestei probleme, este necesară revizuirea muncii altor cercetători care au abordat în diferite articole problema de control descrisă anterior. Scopul unei astfel de examinări este aprecierea algoritmilor și metodelor dezvoltate anterior pentru a stabili direcția de dezvoltare a lucrării prezente. Odată cu evoluția algoritmilor de modelare și control a pendului inversat, se observă progrese semnificative în dezvoltarea strategiilor de control și de modelare pentru robotul instabil autobalansat pe 2 roți.

Controlul stabilității unui pendul inversat amplasat pe un suport fix și antrenat prin intermediul unui motor este abordat în [[1]](file:///C:\Users\Maria\Desktop\Cercetare_teoretica.odt#[1]). Autorii acestei lucrări propun o modelare bazată pe ecuațiile energetice ale pendului, controlul fiind realizat prin comandarea continuă a accelerație motorului de care este legat pivotul (prin aceasta, realizânduse o reglare energetică a sistemului). Această abordare se dovedete însă ineficientă pentru că pivotul nu poate fi stabilizat decât pentru valori foarte mici ale amplitudinii motorului. Într-un studiu mai recent [2], pornind de la constatările asupra modelării și controlului, cercetătorii decid schimbarea premisei de modelare și adoptarea metodei Lagrange pentru descrierea mișcării pendulului în spațiul tridimensional și a gradelor sale de libertate. Rezultatul obținut este liniarizat astfel încât modelul sistemului să fie invariant în timp și exprimat în spațiul stărilor. Aici, regulatorul proiectat este de tip Linear-Quadratic în timp discret și urmărește controlul poziție și al unghiului de înclinare al pivotului (două grade de libertate) prin comandarea tensiunii de intrare în motor. În urma simulării acestui sistem, se constată că dacă regultorul astfel proiectat este atașat modelului neliniar inițial, și folosind un estimator de stare, este posibilă observarea comportamentului controllerului în condiții ideale și estimarea valorilor unor parametrii care nu pot fi identificați din modelul fizic.

Controlul poziție și a unghiului de deviație a unui sistem de tip pendul inversat este relevant datorită dezvoltării ulterioare a algoritmilor de control a robotului autobalansat pe două roți din aceste strategii. Metodele de extragere a modelului sistemului și de aplicare a controlului sunt preluate de către cercetările ulterioare pentru a fi îmbunătățite. Un astfel de exemplu este articolul [3] în care dezvoltatorii primului prototip de robot autobalansat pe două roți realizează o trecere subtilă de la un pendul inversat conectat la un suport fix, la o construcție mobilă. Deși acesta este primul prototip de acest fel, munca de pionierat a dezvoltataorilor merge mai departe propunându-se, de asemenea, modelul dinamic Lagrange pentru descrierea poziției robotului în spațiul tridimensional și gradele lui de libertate pe cele 3 axe de mișcare. Configurația acestui prototip presupune două roți coaxiale interconectate, fiecare cuplată la un motor de curent continuu, pendulul fiind atașat în punctul centrului de greutate a conexiunii celor 2 roți. Această configurație va fi păstrată mai departe, din punct de vedere al designului, aducându-se doar adaosuri în calitatea componentelor filosite sau componente exteriare care nu intervin în proiectarea prezentată. Pentru control, abordarea este una clasică: 2 controllere decuplate, exprimate în spațiul stărilor, care pilotează motoarele pentru a menține sistemul în echilibru (un controller stabilizează poziția pe axa laterală, iar cel de-al doilea reglează deiația de la axa verticală). Cele 2 controllere se ocupă de rezolvarea problemei plasării polilor; la aceasta contribuie un observator de stare.

Având un algoritm de modelare care se dovedește fiabil întrucât oferă o cuantificare a mișcărilor robotului în spațiul tridimensional, este facilitată trecerea spre domeniul controlului avansat. În acest sens, lucrarea [4] tratează problema controlului în timp real, adresând necesitățile hardware (selecția de actuatori și senzori, a unității de procesare de semnal), software (platformă de programre, scheme de modelare și control) și de interfațare între acestea ale unui astfel de proiect, cu scopul de a obține o interfață configurabilă care să fie, mai apoi, folosită ca platformă flexibilă. Pentru control, se folosește aceeași strategie de plasare a polilor menționată anterior; coeficienții de control sunt calculați pentru valorile acestor poli și apoi implementați pe placa integrată a robotului. Răspunsul sistemului este înregistrat. Performanțele controlului se reflectă în capacitatea acestuia de a rejecta perturbațiile exterioare astfel încât robotul să își păstreze poziția verticală prin antrenarea în sens pozitiv sau negativ a motoarelor celor două roți când se constată o deviere de la poziția dorită. Totodată, se observă o creștere a performanțelor sistemului cu deplasarea polilor spre stânga; totuși, nu poate fi depășită o anumită limită deoarece, la turație maximă se pot bloca roțile.

O abordare clasică asupra controlui este oferită în lucrarea [5] unde se propune o reglare de tip PID în jurul unui singur grad de libertate: deviația de la axa verticală. Controllerul dezvoltat este înglobat într-o buclă cu reacție negativă și proiectat după metoda industrială Zigler-Nichols. Deși metoda de design a regulatorului este simplă, controllerul astfel obținut manifestă performanțe dezirabile în sistemul în care este înglobat: răspunsul este oscilant amortizat (ceea ce înseamnă că sistemul urmărește referința dată) iar timpul de răspuns este de 4ms (conform criteriului de 2%). Inconvenientul major al acestei abordări este existența suprareglajului în răspunsul sistemului, fapt care determină rejectarea lentă a perturbațiilor și implicit o revenire greoaie în poziție verticală.

Din punct de vedere al controlului avansat, alegerea care reușește să producă rezultatele cele mai performante din punct de vedere al urmăririi referinței date este controlul care întrebuințează logica fuzzy. Controllerelele de tip fuzzy-logic se dovedesc o alegere bună chiar și în contexte mai complexe. O astfel de conjunctură este descrisă în articolul [6]: robotul este alcătuit din două pendule inversate, legate între ele în mod pasiv. Acest adaos introduce noi grade de libertate care măresc complexitatea și dificultatea controlului și a modelării; analiza sistemului se poate însă simplifica: robotul se consideră ca fiind un dublu pendul inversat. Datorită posibilității unei astfel de abstractizări, se poate aborda, pentru reglare, o strtegie de decuplare și un control tip fuzzy. O strategie de control avansată necesită totodată un model matematic care să descrie cât mai bine comportamentul sistemul și o procesare inteligentă a informațiilor transmise de senzori pentru optimizarea reglării. Din acest motiv, modelul dinamic întrebuințat este derivat din ecuațiile Lagrange pentru două grade de libertate ale robotului (poziția roților pe suprafața de deplasare și unghiul de deviație de la axa verticală) iar controlul fuzzy este bazat pe tehnologia de fuziune a informației. Rezultatele simulării în MatLab ale unui astfel de sistem arată că sistemul este stabilizat cu succes, algoritmul de control fiind fezabil.

O comparație între controlul de tip clasic (metoda industrială) și cel de tip avansat este oferită în lucrarea [7]; urmărind performanțele celor doi algoritmi, se determină avantajele și dezavantajele implementării fiecăruia dintre acești algoritmi. Controlul se realizează, în ambele cazuri, pentru două grade de libertate ale sistemului. În urma simulării în MatLab a celor două regulatoare, s-a observat existența unor avantaje din punct de vedere al răspunsului sistemului în cazul controlului de tip Fuzzy-logic: reducerea timpului de răspuns, aproape fără suprareglaj, la rejectarea perturbațiilor. Aceasta înseamnă reducerea timpului necesar stabilizării. Un alt avantaj important pe care îl aduce acest tip de reglare este diminuarea erorii la poziție, adică robotul instabil autobalansat se pozitionează (în același timp încercănd să-și mențină poziția stabilă) cu o acuratețe mai mare față de cazul în care se utilizează un control de tip PID.

Abordările în domeniul controlului unui robot instabil autobalansat pe două roți sunt numeroase. Totuși, acestea pornesc de la o serie de premise asemănătoare: este menținută constantă arhitectura hardware, metoda de modelare întrebuințată este aceeași în toate lucrările abordate, se încearcă reglarea pentru maxim două grade de libertate ale sistemului și altele. Astfel, atenția se menține asupra strategiei de control abordate și asupra performanțelor sistemului în urma integrării regulatorului în sistem.

# Analiză, proiectare, implementare

Această parte a lucrării cuprinde descrierea pașilor urmați în procesul de proiectare a structurii optimale de control.

## Determinarea modelului matematic al sistemului

Determinarea modelului matematic al unui sistem presupune, în linii mari, descrierea relațiilor dintre variabilele sistemului folosind expresii matematice (de obicei ecuații diferențiale). Se urmărește obținerea unei abstractizări a sistemului real (aici robotul instabil autobalansat pe două roți) și, prin aceasta, o aproximarea a comportamentului acestuia. Determinarea acestor relații matematice se poate face în 2 moduri (sau printr-o combinație între acestea): fie folosind metode analitice, fie folosind metode din identificarea sistemelor.

Prima variantă presupune descompunerea sistemului în mai multe subsisteme ale căror proprietăți sunt bine-cunoscute. În acest caz, pentru obținerea expresiilor matematice ne bazăm pe „legile fizicii” (acest proces mai poartă denumirea de modelare matematică). Odată modelate, aceste subsisteme sunt reunite matematic, obținându-se modelul întregului sistem. Cea de-a doua variantă este fundamentată direct pe experiment; în acest caz, semnalele de intrare și de ieșire ale sistemului sunt înregistrate și analizate pentru obținerea modelului (această abordare mai este cunoscută și ca identificarea sistemului).

Modelul este instrumentul folosit pentru analiză (determinarea caracteristicilor robotului), pentru simulare și predicție (observarea și prezicerea reacțiilor sistemului în situații noi), pentru proiectarea controllerului (determinarea valorilor semnalelor de intrare astfel încât să se obțină comportamentul dorit) și altele [8]. Toate aceaste utilități sunt motivul pentru care modelul sistemului este o componentă esențială în derularea capitolelor următoare.

Sistemul de transport instabil pe două roţi este un robot mobil, autobalansat, pe două roţi şi autonom. Acesta a fost produs de firma INTECO şi are scop strict academic. Din acest motiv, producătorii pun la dispoziţia utilizatorilor şi o componentă software care facilitează operaţiile de modelare şi control, prin intermediul unei interfeţe compatibilă cu MatLab2015a. Rolul principal al acestei interfeţe este transformarea diagramelor Simulink create de către utilizator în cod C (compatibil cu limbajul de programare al sistemului), şi apoi transferarea codului obținut către computerul de bord al robotului. Fiind autonom, robotul este dotat cu un modul dedicat pentru comunicare wireless cu computerul pe care este instalată această componentă software. În acest fel, este eliminată necesitatea existenţei conexiunilor fizice pentru programare sau pentru achiziţii de date. Tot prin intermediul acestui modul este posibilă vizualizarea în timp real a datelor înregistrate de senzorii de la nivelul sistemului în timpul mişcării.

Din punct de vedere structural, sistemul autobalansat este alcătuit din două roți coaxiale, antrenate de câte un motor de curent continuu, un pendul inversat, conecatat la restul sistemului la mijlocul distanţei dintre cele două roți, şi un computer de bord. Computerul de bord este compus din mai multe module dedicate: pentru logica de control şi comunicarea wireless (PandaBoard), pentru achiziţionarea de date (IMU – Inertial Measurements Unit şi Encoder) şi pentru interfaţarea (Interface) modulelor menţionate anterior cu circuitele de comandă şi alimentare ale motoarelor de curent continuu (Batteries, DCMotor, Gear). Arhitectura internă a robotului este oferită de către firma producătoare, în manualul de utilizare al robotului [9], şi este prezentată în schema de mai jos.

|  |
| --- |
| *Fig3.1.1 Diagrama bloc a robotului* [9] |

Manualul de utilizare al robotului [9] oferă o expunere detaliată a componentelor hardware și software, indicații privind realizarea achizițiilor de date pentru modelare și implementarea algoritmilor de control, precum și modelul sistemului obținut prin metoda analitică.

Existența unui modul de achiziționare de date este o facilitate importantă oferită de către firma producatoare întrucât permite modelarea matematică folosind metode din identificarea sistemelor. Așa cum am menționat anterior, această abordare se bazează pe observarea și înregistrarea semnalelor de intrare și de ieșire ale sistemului. Modulul de achiziție de date raportează asupra ieșirilor: poziția roților (printr-un Encoder plasat pe fiecare roată), accelearația unghiulară a acestora (printr-un Accelerometru plasat pe fiecare motor) și viteza unghiulară a pendulului inversat în raport cu axa verticală (printr-un senzor de tip Gyroscop). Intrările sunt semnale de tip Pulse Width Modulation (PWM); lățimea acestui semnal poate fi controlată, obținăndu-se astfel diferite valori de tensiune pentru comanda celor două motoare de curent continuu atașate roților. Lățimea de comandă este cuprinsă între 0 și 1.

O scurtă descriere a funcționalităților și a structurii robotului a fost necesară pentru a avea o viziune de ansamblu asupra facilităților oferite de producător pentru dezvoltarea robotului. Acestea vor fi relevante, în continuare, în procesul de modelare matematică a sistemului.

Este important de menționat că metoda analitică de modelare a fost folosită cu succes atât în [9] cât și în celelalte cercetări științifice citate în cadrul acestei lucrări. Această metodă oferă rezultate de încredere, mai ales că folosește legi și relații foarte bine documentate și testate, așa cum se explică în [8], la care se adugă o cunoaștere aprofundată a proprietăților fizice ale sistemului. În cadrul acestei lucrări se vor folosi, însă, pentru modelare metode provenite din identificarea sistemelor.

Spre deosebire de metoda analitică, premisa de la care se pleacă în acest caz este că nu există informații a priori legate de structura transportorului instabil pe 2 roți; astfel, se urmărește obținerea modelului matematic prin efectuarea de experimente relevante care să surprindă comportamentul sistemului [8]. În [8], L. Ljung definește 3 pași necesari pentru identificarea sistemului folosind acest tip de metode:

1. achiziționarea unui set de date de identificare prin expreimente
2. definirea unui set de modele care pot fi obținute prin specificarea unei categorii de modele în care modelul corect ar putea fi găsit
3. stabilirea unei reguli prin intermediul căreia să se selecteze modelul cel mai potrivit și validarea acestuia

Pentru obținerea modelului sistemului, toți cei 3 pași au fost efectuați, iar rezultatele obținute și concluziile trase sunt relatate mai jos.

### Achiziționarea setului de date

Obținerea unui set de date care să fie apoi folosit în procesul de modelare matematică a sistemului se face prin proiectarea și executarea de experimente folosind sistemul de transport instabil pe 2 roți. În cadrul fiecărui experiment sunt cunoscute valorile celor 2 vectori de intrare care comandă cele 2 motoare de curent continuu, iar ieșirile sistemului vor fi înregistrate pentru prelucrare. Pe lângă aceste mențiuni, autorul cărții [9] adaugă că în proiectarea unui experiment, deciziile luate trebuie astfel încât setul de date obținut să fie cât mai informativ. De la sistem vor fi achiziționate date provenite de la cei 5 senzori integrați în echipament (cele două encodere, cele două accelerometre și gyroscopul).

În timpul desfășurării experimentului, un rol foarte important aparține utilizatorului care conduce experiemntul, întrucât acesta trebuie să aibă o influență constantă asupra transportorului pe tot parcursul experimentului. Acest fapt se datorează particularităților de construcție ale sistemului de transport instabil pe 2 roți: fiind instabil prin natura structurii sale, pendulul inversat atașat modulului de transport nu va menține o poziție verticală ci, în lipsa unui control, va devia de la axa verticală până la întănirea unui obstacol. Pentru a minimiza daunele cauzate de acest eveniment, compania care construiește robotul l-a prevăzut cu un sistem de siguranță responsabil cu:

* oprirea celor două motoare care conduc roțile dacă unghiul de deviație de la axa verticală depășește o anumită valoare;
* protejarea corpului robotului astfel încât acesta să nu facă (în cazul opririi motoarelor) contact complet cu solul.

Din cauza blocării motorului la o anumită deviere a pendului de la poziția verticală, utilizatorul trebuie să fie prezent în timpul experimentul pentru a menține pendulul într-o poziție care să permită funcționarea motoarelor. Necesitatea intervenției utilizatorului ridică problema poziției corecte în care trebuie să se afle sistemul de transport instabil pe 2 roți în timpul desfășurării experimentului. Totuși, menținerea unei poziții perfect verticale sau a unei poziții foarte apropiate de axa verticală nu este de dorit întrucât aceasta nu reflectă comportamentul real al sistemului ci comportamentul care trebuie obținut în urma aplicării algoritmului de control. Poziția recomandată a pendulului este deci între aceste 2 limite: cea impusă prin construcția echipamentului și axa verticală.

În Simulink, a fost proiectat următorul experiment pentru programarea robotului pentru procesul de achiziționarea de date:

|  |
| --- |
| *Fig 3.1.2 Interfața Simulink pentru efectuarea experimentului de modelare a datelor* |

În diagrama Simulink a experimentului, o componentă utilă este blocul „State Observer” ale cărui ieșiri sunt înregistrate pentru modelare în blocul Scope. Nu sunt preluate pentru modelare semnalele brute transmise de senzori la modulul de achiziție de date. Aceste semnale sunt recalculate de către blocul „State Observer” în coordonatele generalizate ***theta***,***psi***, ***phi******thetadot***, ***psidot*** și ***phidot*** [9]. Semnificația fizică a acestora este următoarea:

theta – viteza unghiulară a roților

psi – unghiul de deviație de la poziția verticală

phi – unghiul de rotație în jurul propriei axe (axa verticală)

thetadot – accelearația unghiulară a roților

psidot – viteza unghiulară a deviație de la axa verticală

phidot – viteza unghiulară de rotație în jurul axei verticale

Prin intermediul lor, se obține o descriere mult mai sofisticată a sistemului, întrucât sunt modelate mișcările robotului în spațiul tridimensional. Primele 3 variabilele descriu, așadar, 3 grade de libertate ale sistemului: translație pe axa y (theta), rotație pe axa x (psi) și rotație în jurul axei z (phi), iar următoarele 3 se obțin din cele anterioare prin derivare. Aceste ieșiri sunt obținute prin prelucrarea datelor înregistrate de către senzorii sistemului; porcedeul de prelucrare este descris în manualul de utilizare a al sistemului [9] și presupune fuziunea informației obținute de la mai mulți senzori. Alegerea de păstrare a blocului State Observer (deși acesta nu este definit de utilizator, ci de producătorul robotului) s-a făcut din 2 motive:

* pentru avantajele pe care le aduce prin filtrarea datelor provenite de la encodere, accelerometre și de la gyroscop, întrucât aceste date sunt puternic afectate de zgomot iar filtrarea acestuia (mai ales pentru senzori ca gyroscopul) este foarte dificilă [10].
* pentru avantajele pe care le oferă un observator de stare în momentul proiectării unui controller pentru stabilizarea sistemului (acesta fiind scopul final al lucrării).

Reprezentarea datelor colectate se face în figurile 3.1.3 și 3.1.4:

|  |  |
| --- | --- |
| a) | b) |
| *Fig 3.1.3 Intrările sistemului: a)Intrarea pentru comanda Motor stânga; b)Intrarea pentru comanda Motor dreapta* | |

|  |  |
| --- | --- |
| a) | b) |
| c) | d) |
| e) | f) |
| *Fig 3.1.4 Ieșirile sistemului: a)THETA; b)THETADOT; c)PSI; d)PSIODT; e)PHI; f)PHIDOT* | |

### Definirea unui set de modele

Cea mai importantă clasă de sisteme dinamice, atât în practică, cât și în literatură, este clasa Sistemelor Liniare Invariante în Timp (SLIT). Aceste sisteme sunt idealizări ale proceselor din realitate. În cadrul acestei clase se va desfășura căutarea unui model care să descrie sistemul de transport instabil pe 2 roți. Trebuie analizate, așadar, motivele pentru care sistemul ar putea aparține acestei clase, ținând cont de faptul că robotul, prin însăși natura sa are un comportamnet neliniar. Totuși, concluzia la care s-a ajuns, atât în cercetările anterioare, cât și în [9], este că modelul matematic care descrie comportamentul robotului poate fi liniarizat în jurul unui punct instabil de echilibru (când pendulul inversat se află aproape de poziția verticală). Identificarea sistemului în clasa SLIT este deci posibilă și, având în vedere condițiile de desfășurare a experimentului pentru achiziția de date, identificarea se poate face pornind de la datele deja colecate.

L.Ljung definește în [8] o gamă foarte largă de modele matematice care pot fi folosite pentru descrierea unui SLIT. Totuși, pentru a selecta tipul corect de model care să descrie sistemul instabil pe 2 roți, trebuie respectate anumire constrângeri. În acest sens, decizia de achiziționare pentru modelare a ieșirilor blocului State Observer și nu a ieșirilor reale ale sistemului (cele citite de la senzori), are un impact hotărâtor în alegerea modelului matematic prin care va fi descris sistemul. Existența observatorilor de stare într-un sistem este strâns legată de reprezentarea în spațiul stărilor [8]. Așadar, se impune reprezentarea sistemului în spațiul stărilor. În plus, din moment ce semnalele modelate sunt ieșirile blocului Satate Observer, este necesar ca modelul matematic în spațiul stărilor să respecte Forma Canonică de Observare (FCO), întrucât ieșirile modelate sunt aceleași cu stările observate ale sistemului. Se mai impune, de asemenea, ca modelul matematic obținut să fie instabil (adică polii acestuia să fie situați în semiplanul pozitiv), din moment ce instabilitatea este o caracteristică esențială a sistemului.

Un model în spațiul stărilor descrie relațiile între semnalele de intrare, zgomot și semnalele de ieșire sub forma unui sistem de ecuații diferențiale de ordinul I, folosind un vector *x(t)* numit și vector de stare. Reperzentarea în spațiul stărilor este strâns legată de caracteristicele fizice ale sistemului, motiv pentru care variabilele de stare *x* au semnificație fizică (poziții, viteze, etc.). De aceea, pentru majoritatea sitemelor fizice, construirea modelului în timp continuu este mult mai simplă decăt în timp discret, legile fizicii (de exemplu legile de mișcare newtoniene) folosite pentru modelarea analitică fiind exprimate în timp continuu [8]. Pentru valori foarte mici ale timpului de eșantionare, comportamentul sistemului discret poate fi aporximat cu cel corespunzător sistemului continuu. Deoarece perioada de eșantionare Te = 0,003 secunde, modelul sitemului de transport pe 2 roți va fi estimat în timp continuu [9].

Aceasta înseamnă că în urma modelării, reprezentarea obținută va avea următoare formă:

*ẋ(t)* = A*x(t)* + B*u(t)* + K*e(t)*

*y(t)* = C*x(t)* + D*u(t)* + *e(t)*

Aici, A, B, C, D și K sunt matrice de dimensiuni potrivite (*n* x *n*, *n* x *m*, *n* x *p*, *m* x *p* și *p* x *n*, respectiv un număr de *n* – stări, *m* – intrări, *p* - ieșiri), *e(t)* este zgomot gaussian, iar punctul deasupra lui *x* semnifică diferențierea după timpul *t*.

Reprezentarea unui sistem în spațiul stărilor elimină nevoia descentralizării sistemului de tip Multiple Input, Multiple Output (MIMO) în mai multe subsisteme de tip Multiple Input, Single Output (MISO) sau Single Input, Single Output (SISO), întrucât modelul poate descrie, prin structura sa, un sistem MIMO. Astfel, structura sistemului va fi următoarea:

|  |
| --- |
|  |
| *Fig 3.1.6. Structura modelului sistemului de transport instabil pe 2 roți* |

Identificarea sistemului, cu respectarea tuturor constrângerilor menționate mai sus, s-a făcut cu ajutorul toolbox-ului MATLAB „System Identification Toolbox” [11]. Acesta centralizează și oferă spre folosire funcții MATLAB, blocuri Simulink și aplicații pentru construirea de modele matematice pentru identificarea sistemelor dinamice dintr-un set de date de intrare-ieșire. Accesarea uneltelor de modelare disponibile în cadrul acestui toolbox se face printr-o interfață care permite introducerea setului de date, modelarea rapidă folosind diferite funcții de identificare ușor accesibile din interfață și calcularea procentului de potrivire între setul de date reale și modelul obținut. Constrângerile care trebuie aplicate asupra modelului sunt ușor de impus folosind această interfață. Modelel obținute pot fi salvate ca obiecte în spațiul de lucru MATLAB (Workspace) sau codul folosit pentru obținerea lor poate fi preluat și implementat într-un script MATLAB.

În urma procesului de modelare (în care s-au comparat rezultatele obținute folosind mai multe funcții disponibile în toolbox), s-au ales 3 modele care reușesc cea mai bună aproximare a datelor de identificare. Se menționează că toate modelele au același vector de variabile de stare *x(t)* și același vector de ieșiri *y(t)*:

*x(t)*=[theta, thetadot, psi, psidot, phhi, phidot]

*y(t)*=[theta, thetadot, psi, psidot, phhi, phidot]

Toate cele 3 modele estimate au fost identificate folosind funcția MATLAB ***ssest***; cele 3 modele diferă în principal prin valoarea parametrului Lambda din cadrul opțiunii *Regularization*; prin intermediul acestuia se dispune normarea parametrilor modelului estimat. O altă opțiune care influențează rezultatul estimării este Feedthrough (opțiune utilizată exclusiv pentru estimarea modelului Hf\_MIMO2) care dispune introducerea directă a intrărilor sistemului printre ieșirile acestuia. Spre deosebire de acesta, pentru modelul Hf\_MIMO1 se folosește, în estimarea parametrilor, pe lângă Regularizare, și metoda de căutare a celor mai mici pătrate în subspațiul Gauss – Newton, în timp ce pentru obținerea modelului Hf\_MIMO3 s-au folosit doar setările implicite ale funcției ssest. Mai multe detalii despre algoritmii de estimare disponibili prin intermediul funcției ssest [12] sunt disponibile în [13].

Modele obținute în urma identificării sunt prezentate mai jos:

|  |
| --- |
| 1. Modelul 1: |
|  |
| 1. Modelul 2: |
|  |
| 1. Modelul 3: |
|  |

Polii sistemelor sunt prezentați în tabelul 1 de mai jos:

Tabel 3.1. Polii celor 3 sisteme identificate

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| a) Model 1: | b) Model 2: | c) Model 3: |
|  |  |  |

### Selectarea modelului potrivit și validarea acestuia

Alegerea „celului mai bun” model dintr-un set se stabilește în funcție de performanțele modelului când vine vorba de reproducerea datelor măsurate [8]. În continuare, vor fi comparate procentele cu care fiecare dintre cele 3 modele reușesc să aproximeze datele măsurate pentru a determina care model oferă cea mai bună aproximare pentru cele mai multe stări:

Tabel 3.2. Compararea celor 3 modele

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Modelul** | **theta**  **[%]** | **thetadot [%]** | **psi**  **[%]** | **psidot**  **[%]** | **phi**  **[%]** | **phidot**  **[%]** |
| 1 | 99.78 | 96.19 | 54.92 | 25.33 | 82.4 | 21.14 |
| 2 | 99.94 | 96.12 | 77.19 | 28.76 | 94.35 | 30.36 |
| 3 | 99.76 | 96.12 | 51.41 | 24.85 | 80.56 | 19.62 |
| Cea mai bună estimare | 99.94  **(2)** | 96.19  **(1)** | 77.19  **(2)** | 28.76  **(2)** | 94.35  **(2)** | 30.36  **(2)** |

Conform comparației efectuate mai sus, modelul care reușește cel mai bine aproximarea corectă a datelor măsurate este modelul 2, urmat de modelele 1 și apoi 3.

Ierarhizarea modelelor în funcție de eficacitatea cu care acestea estimează datele măsurate nu garantează însă că modelul ales astfel este suficient de „bun” sau că este valid. Pentru a asigura corectitudinea modelului care va fi ales, un ultim test a fost proiectat pentru a determina care dintre cele 3 modele este cel mai apropiat de adevăr. Acest test are ca scop validarea unuia dintre cele 3 modele întrucât regula modelului care oferă cea mai bună aproximare nu este suficientă pentru a stabili dacă un model aproximează corect comportamentul sistemului.

Astfel, se stabilește ca ultimul test care trebuie trecut să fie testul simulării. Simularea are de obicei ca scop reprezentarea grafică a comportamentului unui sistem pentru observarea acestuia în diverse scenarii de funcționare [14]. Se consideră, deci, valid modelul care aproximează sistemul într-o manieră similară cu modelul determinat prin metode analitice (modelul ideal, determinat de către producătorii echipamentului în [9]); adică modelul care are același comportament în simulare cu cel al modelului ideal.

În figura 3.1.5 au fost reprezentate comportamentele fiecăruia dintre cele 3 modele și a modelului referință (modelul ideal):

|  |
| --- |
| *a)theta* |
| *b)thetadot* |
| *c)psi* |
| *d)psidot* |
| *e)phi* |
| *f)phidot* |
| *Fig 3.1.5 Simularea comparativă a celor 3 modele cu modelul producătorilor: a)theta; b)thetadot; c)psi; d)psidot; e)phi; f)phidot* |

Se observă că în primele două simulări, simularea modelului 1 este cea mai apropiată de simularea modelului ideal iar în ultimele 2 simulări, simularea modelului 2 este cea mai apropiată de simularea modelului ideal. În estimarea stărilor *psi* și *psidot*, nu este evident care dintre cele 3 modele are comportamentul cel mai asemănător cu cel al modelului ideal; în acest caz, se va considera invalid modelul care are un comportament stabil întrucât transportorul este un sistem instabil. Modele 1 și 3 au ambele un comportament instabil și evoluție asemănătoare; ținând însă cont că modelul 1 are performanțe mai bune în estimarea sistemului, s-a decis că Hf\_MIMO1 oferă cea mai bună aproximare a modelului ideal.

Luând în considerare că modele 1 și 2 au capacități de estimare a datelor măsurate apropiate și că testul validității indică modelul 1 ca având un comportament similar în simulare cu cel al modelului referință, s-a decis ca modelul 1 să fie în continuare considerat o descriere suficient de bună a sistemului. Acest model va fi folosit în continuare pentru atingerea scopurilor definite.

Modelul 1, la fel ca modelul analitic, nu este considerat unica și adevărata descriere a sistemului ci, doar o variantă suficient de bună care poate servi cu succes scopul pentru care a fost definit.

## Proiectarea structurii de control

Procesul de proiectarea al unei structuri de control reperzintă o ramură specifică a ingineriei de proiectare. Scopul acestui proces este obținerea comportamentului dorit din partea sistemului prin selectarea adecvată a valorilor secvenței de intrare [8]. Cerințele impuse sistemului de control sunt de obicei specificate sub formă de performanțe. Acestea pot fi formulate în termeni de cerințe în regim tranzitoriu (ca de exemplu suprareglajul maxim, timpul de răspuns etc.), în termeni de cerințe în regim staționar (de exemplu eroarea staționară la poziție în urmărirea semnalului de referință) etc. Aceste performanțe au fost stabilite anterior procesului de proiectare [15].

Pe măsură ce sistemele moderne MIMO evoluează, devenind din ce în ce mai complexe, pentru descrierea sistemului de control este necesar un număr mare de ecuații, dar mai ales interdependețele dintre subsistemedevin supărătoare. Din acest motiv, metodele clasice de de control, care se ocupă de obicei cu designul structurilor de control pentru sistemele SISO, devin nefolositoare pentru sistemele MIMO. Totuși, datorită dezvoltării tehnologice, care a făcut posibilă analiza în domeniul timp al sistemelor complexe, au putut fi elaborate metode moderne de control (bazate pe analiza în domeniul timp și frecvență) capabile să adreseze sisteme de o complexitate crescută și cerințe stricte de acuratețe, cost, spațiu etc. Astfel, teoria modernă de control propune un proces simplificat de proiectare a structurii de control, bazat efectiv pe sistemul reglat. Dezavantajul acestei abordări este sensibilitatea sistemului la eroarea care intervine prin modelarea matematică a procesului real. Aceasta înseamnă că un controller proiectat folosind modelul matematic al sistemului s-ar putea să nu stabilizeze sistemul real. Pentru a evita această situație, structura de reglare va fi proiectată pentru a include această incertitudine (eroare) [15].

Un sistem de control cu reacție negativă este un sistem în care între semnalul de ieșire și intrarea de referință există o relație prestabilită; scopul este menținerea acestei relații prin compararea celor două semnale și utilizarea difereței dintre ele ca agent de control. Acest sistem se mai numește și sistem de control în buclă închisă. Avantajul sistemelor de control cu reacție negativă este insensibilitatea la perturbații externe și la variații ale parametrilor interni în anumite limite minime de variație. Este așadar posibilă utilizarea componentelor inexacte pentru a obține un control precis. Trebuie menționat că utilizarea sistemelor în buclă închisă este avanatajoașă doar când în sistem pot apărea perturbații și/sau variații neprevăzute. Pe de altă parte, stabilitatea este o problemă majoră în astfel de sisteme deoarece bucla de reacție tinde să corecteze erorile în mod excesiv, ceea ce cauzează oscilații în sistem [15].

Sistemul de transport instabil pe două roți este autonom; acest aspect îl face vulnerabil la perturbații și impune necesitatea adaptării rapide la schimbările care apar în scopul respectării cerințelor impuse de către utilizator în timpul funcționării. Din acest motiv, un sistem de control în buclă închisă va fi utilizat pentru stabilizarea transportorului instabil pe două roți în poziție verticală. Schema de principiu din figura 3.2.1 ilustrează structura tipică a unui sistem de control în buclă închisă:

|  |
| --- |
| *Fig. 3.2.1 Structură tipică de control în buclă închisă* |

În alegerea algoritmului care va fi utilizat pentru proiectarea structurii de control se va ține cont de două aspecte:

1. specificațiile de control
2. particularitățile modelului utilizat

Specificațiile de control, în acest caz, sunt: menținerea transportorului în poziție verticală (într-un punct instabil de echilibru) și deplasarea robotului în spațiul tridimensional pe o anumită distanță. Aceste cerințe au ca scop centralizarea controlului asupra stabilizării sistemului, în timp ce mișcările robotului în spațiul tridimensional sunt limitate. Consecința acestor specificații este impunerea valorilor referințelor pentru vitezele roților și pentru unghiurile de deviație de la axa verticală la zero.

Din punct de vedere al modelului matematic al sistemului, sistemul de transport instabil pe două roți este descris, așa cum este menționat în capitolul anterior, prin intermediul unui model în spațiul stărilor. Trebuie considerat, în acest sens, observatorul de stare întrebuințat în procesul de achiziționare a setului de date de identificare datorită căruia sunt identificate stările sistemului și nu ieșirile reale ale acestuia. Astfel, în designul structurii de reglare se va urmării controlul stărilor sistemului și nu a ieșirilor acestuia; realizarea controlului în bucla închisă fiind făcut cu reacție de la stare.

Designul regulatoarelor folosind reacția de la stare începe cu testarea controlabilității și observabilității sistemului [16]. Un sistem este controlabil la momentul de timp *t0* dacă este posibilă transformarea stării inițiale *x(t0)* în orice altă stare, într-un timp finit, prin utilizarea unui vector de control. De asemenea, un sistem se numește observabil la momentul *t0* dacă este posibilă determinarea stării *x(t0)* prin observarea ieșirilor sistemului de-a lungul unui interval finit de timp. Aceste concepte au fost introduse de Kalman și joacă un rol foarte important în proiectarea structurii de reglare pentru un sistem descris în spațiul stărilor. Soluția pentru problema de control a sistemului nu există dacă sistemul nu este controlabil [15].

Verificarea controlabilității sistemului se poate face în MATLAB cu ajutorul funcției ***crtb*** [17] iar verificarea observabilității sistemului cu ajutorul funcției ***obsv*** [18]. Aceasta calculează matricea de controlabilitate, respective matricea de observabilitate, având ca argument modelul matematic al sistemului în spațiul stărilor. Un sistem este controlabil dacă rangul matricei de controlabilitate este maxim. Un sistem este observabil dacă rangul matricei de observabilitate este maxim. Matricea de controlabilitate și matricea de observabilitate a procesului în discuție, precum și rangrile lor (calculate prin intermediul funcțiilor MATLAB) sunt reprezentate în figurile 3.2.2 și 3.2.3:

|  |
| --- |
| *Fig. 3.2.2: Matricea de controlabilitate și rangul ei* |
|  |
| *Fig. 3.2.3: Matricea de observabilitate și rangul ei* |

După cum se observă în figurile 3.2.2 și 3.2.3, ambele matrice au rangul maxim (6); aceasta înseamnă că sistemul este complet controlabil, respectiv complet observabil și deci se poate proiecta o structură pentru controlul tuturor celor 6 stări ale sistemului (theta, thetadot, psi, psidot, phi, phidot). Având, așadar, posibilitatea de a controla și de a observa toate stările sistemului, se poate proiecta pentru acest sistem o sructură de control în buclă închisă cu reacție completă de la stare.

Reglarea în buclă închisă, cu reacție completă de la stare, are ca scop principal rezolvarea problemei de plasare a polilor cu scopul de a aduce sistemul în regiunea de funcționarea stabilă. Algoritmul folosit pentru designul controllerului trebuie ales ținând cont că răspunsul sistemului trebuie să urmărească o referință aleasă de către utilizator prin controlul semnalelor de intrare care comandă cele două motoare de cuent continuu atașate roților. De asemenea, sistemul trebuie să aibă performanțe satisfăcătoare în urmărirea referinței (valori rezonabile pentru suprareglaj, timp de răspuns etc.) [15].

Pentru designul structurii de control care va fi folosită penru stabilizarea sistemului de transport instabil pe două roți în poziție verticală s-a ales algoritmul Linear Quadratic Regulator (LQR). LQR este o metodă optimală de control care oferă o soluție sistematică de calculare a matricei de ponderi de control a reacției de la stare [15]. Această alegere este motivată de legătura strânsă care există între noținuea de optim și proiectarea strucutrilor de control pentru sistemele MIMO. Conform studiilor, metodele optimale de control generează doar structuri care stabilizează sistemele MIMO. De asemenea, metoda LQR este o tehnică binecunoscută de proiectare a regulatoarea care oferă ponderi de reacție practice [19]. Procedura de obținere a soluției optime de control va fi descrisă pe scurt în cele ce urmează, în relație cu sistemul de transport instabil pe două roți.

Transportorul este descris de următoarea ecuație de stare:

***ẋ(t)*  = A*x(t)* + B*u(t)*** (3.1)

Pornind de la aceasta, se va determina matricea optimală de control **K**:

***u(t)* = -K*x(t)*** (3.2)

astfel încât să se obțină o valoare minimă a indicelui de performanță:

***J*** = (3.3)

unde:

* matricea **Q** este pozitiv-definită (sau poizitiv-semidefinită) hermitiană sau real simetrică;
* matricea **R** este pozitiv definită hermitiană sau reală simetrică.

Ecuația matriceală (3.2) estimează costul energetic al semnalelor de control; în cadrul acesteia, matricele **Q** și **R** determină importanța relativă a erorii (diferența dintre starea dorită și starea obținută) și, respectiv, costul energie de control [15]. În figura 3.2.4 se prezintă diagrama bloc a unui sistem de control optimal:

|  |
| --- |
| *Fig. 3.2.4: Controlul optimal al unui sistem (diagrama bloc)* [15] |

În [15], autorul descrie 2 pașii care trebuie urmați pentru proiectarea structurii de control **K**:

1. Rezolvarea ecuației matriceale Ricatti:

**PA + ATP + Q – PBR-1BTP = 0**  (3.4)

și aflarea matricei **P**; dacă **P** există și este pozitiv-definitiă, atunci sistemul este stabil.

1. Aflarea matricei optimale de control **K** prin înlocuirea lui **P** în ecuația:

**K = R-1BTP** (3.5)

În MATLAB, clacularea matricei optimal **K** este facilitată de funcția ***lqr*** [20]. Această funcție este definită în cadrul Control System Toolbox și returnează matricea optimală de ponderi **K** conform algoritmului descris mai sus, precum și soluția ecuației matriceale Ricatti (**P**) și polii sistemului în buclă închisă. Pentru designul matricei optimale de control utilizatorul trebuie să furnizeze modelul matematic al sistemului și matricele **Q** și **R**.

Întrucât modelul matematic al sistemului de transport instabil pe două roți a fost determinat în capitolul anterior, mai este necesară doar proiectarea matricei de importanță a erorii și a matricei costului energetic de control. În procesul de design al celor două matrice se va ține cont atât de specificațiile de control formulate anterior cât și de particularitățile de construcție ale transportorului. Astfel, având în vedere că prin specificații se impune stabilizarea în poziție verticală și deplasarea robotului pe o distanță predefinită (în linie dreaptă), se poate extrage importanța pe care o are deviația fiecăreia dintre stări de la referința impusă pentru aceasta și, implicit, costul energetic al controlului în condițiile cerute prin specificații.

În procesul de proiectare a matricelor **Q** și **R** trebuie să se țină cont de condițiile impuse anterior (Q ≥ 0, Q = QT; R > 0, R = RT). Pentru a asigura respectarea acestor condiții, cea mai simplă variantă este alegerea lui Q și R drept matrice diagonale, având elementele de pe diagonală pozitve sau zero [9]. De asemenea, pentru matricea Q, se va considerea că valoarea fiecărui element de pe diagonala principală este proporțională cu importanța unei variabile de stare în cadrul sistemului de control (în funcție de ordinea în care apar la ieșirea din observatorul de stare). Se procedează la fel pentru matricea R, considerând că fiecare valoare de pe diagonală corespunde costului energetic al unei intrări în sistemul de control.

Pornind de la cerința de menținere a transportorului în poziție verticală, se impune acordarea unei importanțe deosebite variabilei de stare *psi* care precizează unghiul de deviație de la axa verticală; datorită măsurilor de siguranță (se oprește funcționarea motoarelor dacă se depășește un anumit unghi de înclinație) controlul acestei stări devine și mai important întrucât atingerea tuturor obiectivelor de control depinde de aceasta. Așadar, variabilei de stare *psi* i se va acorda cea mai mare importanță.

Următoarea specificație care trebuie respectată se referă la deplasarea robotului în linie dreaptă pe o distanță predefinită; pentru îndeplinirea acestei cerințe, trebuie luate în calcul vitezele celor două roți ale transportorului. Astfel, acestea trebuie să aibă aceeași viteză pentru a menține direcția de deplasare; rezultă, deci, că unghiul de rotație în jurul propie axe trebuei să fie zero. Din acest motiv, în matricea Q se va acorda o importanță mărită și variabilei *phidot* (viteza de rotație în jurul axei verticale).

Considerând specificațiile de control care trebuiesc satisfăcute de către structura de control, s-a stabilit următoarea ordine în importanța stărilor controlate: *psi*, *phidot*, *phi*, *thetadot*, *theta*, *psidot*. Controlul vitezei și accelerației unghiulare a roților se consideră o sarcină secundară menținerii poziție verticale și a direcției de deplasare (ținându-se cont că viteza roților depinde accelerația acestora). Starea *psidot* (viteza unghiulară de deviație de la axa verticală) este plasată în ierarhie ca fiind cea mai puțin importantă înrucât viteza cu care pendulul inversat se depărtează de punctul instabil de echilibru este monitorizată prin intermediul variabilei *psi*. Matricea Q, obținută prin respectarea constrângerior discutate mai sus este prezentată mai jos:

**Q** =

Pentru proiectarea matricei de cost R se pot extrage informații importante legate de costrul energetic al controlului celor 2 intrări ale sistemului; întrucât matricea de costuri este strâns legată de intrările sistemului, aceasta va avea 2 linii și 2 coloane întrucât transportorul dispune de două motoare de curent continuu care pot fi controlate. Cerințele de menținere în echilibru al transportorului și deplasare a acestuia în linie dreaptă impun atribuirea de costuri egale pentru ambele intrări de control ale transportorului. De asemenea, din moment ce controlul motoarelor care antrenează roțile sistemului de transport instabil este singura modalitate prin care se pot îndeplini specificațiile de control, costul intrărilor va fi foarte mare. Designul matricei R, considerând toate condițiile impuse, este prezentat mai jos:

**R** =

Este important de menționat că designul acestor matrice a fost determinat prin încercări multiple. Corectitudinea designului celor 2 matrice a fost verificat în două moduri:

* cu ajutorul matricei P (soluția ecuației matriceale Ricatti) astfel: dacă matricea este pozitiv definită, atunci sistemul este stabil [15];
* prin simulare: s-au simulat structurile de control obținute folosind schemele de simulare oferite de producătorii sistemului de transport instabil pe două roți în [9] (despre această etapă se va discuta pe larg în capitolul următor)

Matricea optimă de control **K**,soluția ecuație matriceale Ricatti și polii sistemului în buclă închisă a fost opținuți prin apelarea funcție MATLAB ***lqr***. Rezultatele obținute sunt prezentate în figura 3.2.4:

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
| *Fig. 3.2.4: Matricea optimă de control K, soluția ecuație matriceale Ricatti (pozitv definită) și polii sistemului în buclă închisă* |

Avantajele utilizării LQR pentru generarea matricei optime de control K sunt:

* K este o matrice statică de ponderi; în consecință ordinul sistemului în buclă închisă este același cu cel al sistemului real;
* obținerea unei margini de amplitudine care (adică locul rădăcinilor în sistem se apropie de originea sistemului de coordonate de-a lungul axei imaginare) și a unei margini de fază mai mare de 60; aceste performanțe asigură robustețe [19];
* polii instabili ai sistemului sunt plasați în regiunea stabilă de funcționare [19];
* în cazul unui sistem complet stabil, ponderile matricei de control vor tinde la zero [19].

Un dezavantaj important al utilizării unui algoritm de control optimal ca LQR îl reprezintă necesitatea de observabilitate și controlabilitate a stărilor sistemului.

## Simulare

Simularea este o parte importantă a designului oricărei structuri de control. Acest proces presupune testatrea performanțelor structurii proiectate în mediul virtual (folosind modele matematice), cu scopul de a evita producerea de daune asupra echipamentului real, în cazul în care, pe parcursul procesului de proiectare, s-au făcut greșeli. În acest scop, producătorii sistemului de transport instabil pe două roți oferă posibilitatea de simulare a sistemului de control folosind modele matematice obținute prin metode analitice. Sunt disponibile două scheme pentru simularea structurii de control (disponibile prin intermediul pachetului software de programare al transportorului):

* una folosind un model liniar al transportorului
* alta folosind un model neliniar al sistemului de transport (mai apropiată de comportamentul sistemului real)

În figura 3.3.1 sunt prezentate schemele utilizate pentru simularea structurii de control obținute în capitolul anterior:

|  |
| --- |
| *Fig. 3.3.1 a)Schema de simulare folosind un model liniar;* |
|  |
| *Fig. 3.3.1: b) Schema de simulare folosind un model neliniar* |

Pe lângă bucla închisă de reacție (care conține modelul sistemului, structura de control și referința), în diagramele din figura 3.3.1 se mai pot regăsi blocuri Scope utilizate pentru vizualizarea semnalelor de control și a stărilor sistemului, un convertor și un scope. Blocul convertor recalculează viteza unghiulară a roților (radiani/secundă) în metri pentru distanța parcursă și poziția unghiulară (radiani) în grade pentru unghiul de deviație de la axa verticală. Variabilele de stare (*theta*, *thetadot*, *psi* și *psidot*) convertite la noile unități sunt apoi afișate în blocurile HRState și HRDotState. Referința sistemului de control a fost aleasă ținând cont de specificațiile de control impuse pentru sistemul real; astfel, referința pentru variabilele de stare *thetadot*, *psi*, *psidot*, *phi* și *phidot* este zero iar referința pentru starea *theta* este 6.66 (care reprezintă 0.5 metri convertiți în radiani). Din punct de vedere structural, cele două experimente de simulare sunt identice, diferind doar prin tipul de model utilizat pentru simulare [9].

Rezultatele obținute în urma efectuării celor două experimente de simulare sunt reprezentate în figurile 3.3.2 și 3.3.3:

|  |
| --- |
| *a)* |
| *b)* |
| *Fig. 3.3.2: Rezultatele simulării folosind modelul liniar: a)theta și psi convertite la noile unități; b)semnalele de control pentru cele două motoare ce curent continuu* |

Performanțele de control obținute sunt prezentate în tabelul 3.3:

Tabel 3.3. Performanțele de control (modelul liniar)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Model liniar** | [%] | **tr** [sec] | **stp** | Domeniul de variație ***u*** |
| theta | 31 | 14 | 0 | [-0.115; 0.113] |
| psi | 64.91 | 13 | 0 |

|  |
| --- |
| *a)* |
| *b)* |
| *Fig. 3.3.3: Rezultatele simulării folosind modelul neliniar: a)theta și psi convertite la noile unități; b)semnalele de control pentru cele două motoare ce curent continuu* |

Performanțele de control obținute sunt prezentate în tabelul 4:

Tabel 3.4. Performanțele de control (modelul neliniar)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Model neliniar** | [%] | **tr** [sec] | **stp** | Domeniul de variație ***u*** |
| theta | 25 | 10 | 0 | [-0.115; 0.113] |
| psi | 65.1 | 12 | 0 |

Performanțele de control obținute în simulare indică stabilizarea sistemului de transport instabil pe două roți conform cerințelor precizate prin specificații. Așadar, structura de control proiectată poate fi implementată pe computerul de bord al transportorului real.

## Implementarea de prototipuri de control în MATLAB/Simulink

Implementarea unei structuri de reglare proprii în programul de control al sistemului de transport instabil pe două roți se face prin intermediul schemelor Simulink, în mediul MATLAB. În proiectarea acestor scheme de programare trebuie respectate anumite cerințe impuse de particularitățile de programare ale plăcii de comandă. Programarea plăcii de bază a sistemului se face folosind toolbox-ul The Simulink Coder.

Cea mai simplă modalitate prin care se poate crea un model Simulink care să poată fi apoi implementat pe placa de bază a sistemului de transport pe două roți este pornind de la template-urile oferite prin intermediul aplicației software oferită de către compania producătoare. Se poate implementa orice algoritm de control, folosind majoritatea blocurilor disponibile în librăria Simulink (un număr foarte mic de blocuri nu sunt compatibile cu PandaBoard). Pentru implementarea structurii de control proiectate anterior prin intermediul algoritmului LQR s-a folosit schema Simulink din figura 3.4.1:

|  |
| --- |
| *Fig. 3.4.1: a)Experiment de control în timp real folosind controlul optimal – Schema principală* |
|  |
| *Fig. 3.4.1: b)Experiment de control în timp real folosind controlul optimal -Subsistemul Controller;* |

Este posibilă implementarea oricărui model de control. Totuși, următoarele elemente nu pot fi eliminate din designul buclei de control disponibilă în template: blocul *UnTrans Driver* (programul conducător al transportorului), butonul *Build & Send to Target* (creează un fișier executabil conform schemei Simulink și trimiterea lui către PandaBoard), butonul *Activate* (activarea aplicație de timp real) și blocul *Watchdog* (blochează semnalele de control în cazul în care unghiul de deviație al pendulului este foarte mare); este recomandată păstrarea blocului *StateObserver* și a blocului State pentru observarea stărilor sistemului.

În cadrul schemei din figura 3.4.1 sunt folosite 3 blocuri scope:

* Ctrl – pentru afișarea și memorarea semnalelor de control
* State - pentru afișarea stărilor sistemelor; în acest scope, stările sunt reprezentate în radiani și radiani/secundă
* HRState – pentru afișarea stărilor selectate (*theta*, *thetadot*, *psi* și *psidot*) transformate în unități de măsură umane (metri, metri/secundă, grade etc.)

Alte blocuri importante sunt:

* *Saturation* și *Coulomb & Viscous Friction* care au rolul de a satura și liniariza semnalele de intrare pentru comanda motoarelor transportorului; detalii suplimentare sunt oferite în [21] și [22];
* *Safety* cu ajutorul căruia sunt monitorizate valorile semnalelor de control astfel încât să nu se depășească o valoare maximă admisă pentru lățimea semnalului PWM în comanda motoarelor transportorului;
* *Constant* folosite pentru configurarea referinței: *x0 =* (*0.5, 0, 0.384, 0, 90, 0*); set point-ul poate fi ales folosind mărimi „umane”, întrucât acestea sunt convertite apoi în radiani; referința stărilor *thetadot*, *psidot* și *phidot* este zero deoarece sunt derivatele stărilor *theta*, *psi* și *phi.*

Pentru transferarea wireless unui nou fișier executabil pe placa de bază a transportorului și efectuarea experimentului trebuie urmați următorii pași:

1. Se proiectează schema de programare Simulink
2. Se fac configurațiile necesare tuturor parametrilor Simulink pentru crearea unui fișier executabil de timp real, așa cum sunt specificate în [9]
3. Se creează și se trimite un nou fișier executabil prin apăsarea butonului *Build & Send to Target*
4. Se activează aplicația trimisă
5. Se apasă apoi butonul *Connect to target*  din partea de sus a schemei Simulink
6. Înainte de pornirea aplicație de timp real, pendulul sistemului de transport instabil pe două roți trebuie ținut în poziție de echilibru astfel încât sistemul de oprire a roților să nu intervină
7. Se pornește aplicația de timp real prin apăsarea butonului *Start Simulation* 

Rezultatele obținute în urma implementării schemei de control și efectuare experimentului de control au fost reprezentate în figura 3.4.2 iar performanțele de reglare ale sistemului sunt redate în tabelul 3.

|  |
| --- |
| *Fig. 3.4.2: a) Rezultatele implementării în sistemul real: theta și psi (exprimate în unități umane);* |
|  |
| *Fig. 3.4.2: b)Rezultatele implementării în sistemul real: semnalele de control pentru cele două motoare ce curent continuu* |

Tabel 3.5. Performanțele sistemului de control real

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Model validare** | [%] | **tr** [sec] | **stp** | Domeniul de variație ***u*** |
| theta | 36.51 | 6 | 0.13 | [-0.212; 0.426] |
| psi | 62.8 | 6 | -5 |

# Concluzii

Acest proiect de diplomă prezintă o posibilă abordare pentru proiectarea și implementarea unei structuri de control optimale pentru stabilizarea în poziție verticală și deplasarea pe o anumită distanță a unui sistem de transport instabil pe două roti. Sunt cercetate și prezentate avantajele proiectării structurilor de reglare utilizând algoritmi optimali de control. Proiectarea folosind LQR are ca scop demonstrarea performanțelor superioare obținute prin întrebuințarea algoritmilor optimali și totodată încurajarea utilizării metodelor moderne de design al structurilor de control atât în cadrul sistemelor dinamice continue cât și în cadrul sistemelor dinamice discrete.

Teza de licență de față a fost dezvoltată în cadrul cercetărilor curente care se desfășoară în laboratorul de IRA - Ingineria Reglării Automate, la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. Sistemul de transport instabil pe două roti a fost recent procurat, cu scopul de a încuraja dezvoltarea și testarea de structuri moderne de control. Se dorește astfel lărgirea și diversificarea posibilităților de cercetare în domeniul controlului automat. În acest context, abordarea propusă prin intermediul tezei de licență are aplicabilitate în lumea reală și urmărește atât investigarea comportamentului transportorului cât și dezvoltarea de structuri de control capabile să satisfacă anumite specificații impuse.

Așa cum s-a observat în capitolul anterior, pot fi identificate două problem esențiale care trebuie rezolvate pentru a obține un sistem de control stabil, capabil să urmărească referințele impuse: problema identificării sistemului și problema proiectării unei structuri de control optimal. Pentru a atinge obiectivele de control propuse (stabilizarea sistemului în poziție vertical și deplasarea acestuia pe o anumită distanță), am lucrat la determinarea unui model matematic în spațiul stărilor obținut prin identificarea sistemului din date experimentale care să descrie cât mai bine comportamentul sistemului, la designul matricelor Q (importanța relativă a erorii) și R (costul energiei de control) pentru obținerea matricei optimale de control, precum și la dezvoltarea unei scheme Simulink prin intermediul căreia să se introducă în programul de control al sistemului de transport instabil pe două roți a structurii optimale de reglare proiectate.

## Rezultate obținute

Acest proiect de licență este dezvoltat în conformitate cu standardele și constrângerile impuse prin particularitățile de construcție ale sistemului de transport instabil pe două roti, descrise în [9] de către producătorii echipamentului. Nevoia de eficientizare a controlului automatizat al unor procese neliniare complexe și cerințele de operare în timp real au impus dezvoltarea de noi metode care să optimizeze procesul de proiectare a structurii de control în vederea obținerii unei soluții corespunzătoare. Dintre abordările existente, în proiectul de față, s-a ales întrebuințarea algoritmului LQR pentru proiectarea unui controller optimal, capabil să îndeplinească anumite cerințe de performanță și control (descrise în capitolul 1 al lucrării de față). Prin utilizarea structurilor optimale de control se încearcă stabilizarea cât mai rapidă a sistemului și o toleranță crescută la perturbațiile din mediul exterior.

Abordarea aleasă în acest proiect de licență se axează, de asemena, și pe identificarea unui model matematic liniarizat folosind date achiziționate prin efectuarea de experimente care să ilustreze cât mai bine comportamentul real al sistemului. Deși comportamentul transportorul este, prin natura sa, puternic neliniar, acesta poate fi aproximat prin intermediul ecuațiilor liniare într-un punct instabl de echilibru. Astfel se poate estima un model liniar al sistemului de transport instabil pe două roți care să fie mai apoi folosit în procesul de proiectare al structurii optimale de control.

Structura optimală de control proiectată pe baza modelului matematic identificat se dovedește a fi validă întrucât, prin implementarea pe echipamentul real, reușește stabilizarea sistemului în poziție verticală și deplasarea acestuia pe o distantă impusă prin referință. Testarea cu succes a controllerului proiectat pe sistemul de transport instabil pe două roți implică, de asemenea, și validitatea modelului liniar identificat.

Contribuțiile personale la licență sunt următoarele: proiectarea și executarea experimentului de achiziționare de date, identificarea modelului matematic al sistemului, designul matricelor Q și R pentru obținerea matricei de control optimal K și designul și implementarea experimentului de testare a structurii de control proiectate pe echipamentul real. Prin control se urmărește demonstrarea performanțelor de reglare și scoaterea în evidență a toleranței crescute la perturbații a sistemului de control obținut.

## Direcții de dezvoltare

Problema abordată în această cercetare rămâne una deschisă, existând multiple posibilități de dezvoltare de structuri de control prin intermediul unei game variate de metode. Sistemul de control propus, a cărui proiectare este bazată pe un model matematic liniarizat obținut prin aproximarea comportamentului sistemului de transport instabil pe două roți într-un punct de echilibru instabil, s-a dovedit a fi unul valid, capabil să impună funcționalitatea dorită.

Direcțiile viitoare de dezvoltare care pot fi luate în considerare trebuie să țintească spre îmbunătățirea performanțelor de control obținute prin structura de reglare propusă, fie prin întrebuințarea în proiectarea controllerului a unui algoritm de control altul decât LQR, fie prin adăugarea în bucla de control a unui bloc integrator (sau a unui bloc dublu integrator).

O posibilitate interesantă de dezvoltare ar fi proiectarea structurii de control folosind algoritmul Linear Quadratic Gaussian – LQG care propune proiectarea unei soluții optimale de control prin minimizarea valorii prezise a costului quadratic. Problema controlului LQG este de obicei legată de sistemele liniare în care ieșirile sunt corupte de un zgomot alb aditiv Gaussian.

O altă posibilitate care poate fi explorată este dezvoltarea și analizarea controlului în medii în care suprafața pe care se deplasează transportorul nu este complet netedă și solidă (de exemplu când suprafața de deplasare este nisipoasă sau moale). În această situație, un aspect important care trebuie luat în considerare este efortul de control depus în urmărirea referințelor impuse în mișcarea sistemului.

# Bibliografie

|  |  |
| --- | --- |
| [[1] | K. Yoshida, "Swing-up Control of an Inverted Pendulum by Energy-Based Methods," in *Proceeding of the American Control Conference*, 1999. |
| [[2] | F. Dusek, D. Honc, K. R. Sharma and L. Havlicek, "Inverted Pendulum Optimal Control Based on First Principle Model," *Springer International Publishing Switzerland,* pp. 63 - 74, 2016. |
| [[3] | F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi and A. Rufer, "JOE: A Mobile, Inverted Pendulum," *IEEE Trans. Electronics,* vol. 49, no. 1, pp. 107 - 114, 2002. |
| [[4] | S. W. Nawawi, M. N. Ahmad and J. H. S. Osman, "Real-time control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot," *Word Academy of Science, Engineering and Technology,* vol. 39, pp. 214 - 220, 2008. |
| [[5] | U. Adeel, K. S. Alimgeer, O. Inam, A. Hameed and M. Ashraf, "Autonomus Dual Wheel Self Balancing Robot Based on Microcontroller," *Jurnal of Basic and Applied Scientific Research,* vol. 3, no. 1, pp. 843 - 848, 2013. |
| [[6] | Q. Qian, J. Wu and Z. Wang, "A Novel Configuration of Two-Wheeled Self-Balancing Robot," *Tehnički vjesnik,* vol. 24, no. 2, pp. 459 - 464, 2017. |
| [[7] | F. A. Raheem, B. F. Midhat and H. S. Mohammed, "PID and Fuzzy Logic Controller Design for Balancing Robot Stabilization," *Iraqi Journal of Computer, Communications, Control & System Engineering (IJCCCE),* vol. 18, no. 1, 2018. |
| [[8] | L. Ljung, in *SYSTEM IDENTIFICATION: Teory for the user*, Englewood Cliffs, New Jersey, P. T. R. Pretice-Hall, Inc., 1987, pp. 1 - 127. |
| [[9] | INTECO, Two-Wheeled Unstable Transporter: User's manual, www.inteco.com.pl. |
| [[10] | B. Zhang and G. Wu, "Design of two-wheel self-balancing vehicle based on visual identification," *Eurasip Jourmal on Image and Video Processing,* vol. 2019, no. 1, 2019. |
| [[11] | MathWorks, "System Identification Toolbox," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/help/ident/index.html. |
| [[12] | MathWorks, "MathWorks Documentation - ssest," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/help/ident/ref/ssest.html. |
| [[13] | MathWorks, "MathWorks Documentation - ssestOptions," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/help/ident/ref/ssestoptions.html. |
| [[14] | MathWorks, "Modeling and Simulation," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/discovery/modeling-and-simulation.html. |
| [[15] | K. Ogata, Modern Control Engineering, Pretice Hall, 2010. |
| [[16] | R. C. Dorf and R. H. Bishop, Modern Control System, Pretice Hall, Inc., 2011. |
| [[17] | MathWorks, "MathWorks Documentation - ctrb," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/help/control/ref/ctrb.html. |
| [[18] | MatlabWorks, "MathWorks Documentation - obsv," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/help/control/ref/obsv.html. |
| [[19] | "LINEAR QUADRATIC REGULATOR," pp. 92 - 98. |
| [[20] | MathWorks, "MathWorks Documentation - lqr," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/help/control/ref/lqr.html. |
| [[21] | MathWorks, "MathWorks Documentation - Coulumb & Viscous Friction," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/help/simulink/slref/coulombandviscousfriction.html. |
| [[22] | MathWorks, "MathWorks Documentation - Saturation," 1994-2019 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://ch.mathworks.com/help/simulink/slref/saturation.html. |

# Anexa 1. Lucrare științifică

Munca de cercetare depusă pentru dezvoltarea acestei teze de licență a fost rezumată în articolul atașat.

Articolul a fost acceptat și prezentat în cadrul *Conferinței ACSC 2019*, care a avut loc în data de 28 Iunie 2019, în Cluj-Napoca.