

MINISTERUL EDUCAȚIEI



UNIVERSITATEA TEHNICĂ

DIN CLUJ-NAPOCA

FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE

Proiectarea, Implementarea și Dezvoltarea unui Sistem de Control pentru un Stand Experimental Bilă-Masă

PROIECT DE DIPLOMĂ

Autor: **Răzvan-Ioan BOTEZAT**

Conducător științific: **Conf. dr. ing. Roxana Rusu-Both**

2024



Vizat,

DECAN

Prof. dr. ing. Mihaela DÎNȘOREANU

DIRECTOR DEPARTAMENT AUTOMATICĂ

Prof. dr. ing. Honoriu VĂLEAN

Autor: **Răzvan-Ioan BOTEZAT**

Proiectarea, Implementarea și dezvoltarea unui Sistem de Control pentru un Stand Experimental Bilă-Masă

1. **Enunțul temei:** *În acest proiect de diplomă se va proiecta și implementa un stand experimental de tipul bilă-masă. O altă parte importantă a prezentului proiect se axează pe proiectarea și implementarea unui sistem de control capabil să stabilizeze o minge pe o suprafață plană și să compenseze deplasarea mingii datorită posibilelor interacțiuni umane sau perturbări ale mediului.*
2. **Conținutul proiectului:** *Pagina de prezentare, Declarație privind autenticitatea proiectului, Sinteza proiectului, Cuprins, Introducere, Studiu Bibliografic, Analiză și Proiectare, Implementare și Testare, Concluzii, Bibliografie, Anexe.*
3. **Locul documentării:** *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*
4. **Consultanți:** *nu este cazul*
5. **Data emiterii temei:** 03.11.2023
6. **Data predării:** 12.07.2024

Semnătura autorului

Botezat

Semnătura conducătorului științific

RRBoteh



**Declarație pe proprie răspundere privind
autenticitatea proiectului de diplomă**

Subsemnatul(a) **Răzvan-Ioan BOTEZAT**,
legitimat(ă) cu CI/BI seria XV nr. 364955, CNP 5010509336699,
autorul lucrării: Răzvan-Ioan BOTEZAT

elaborată în vederea susținerii examenului de finalizare a studiilor de licență la
Facultatea de Automatică și Calculatoare, specializarea **Automatică și Informatică
Aplicată**, din cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, sesiunea iulie 2024 a anului
universitar 2023-2024, declar pe proprie răspundere, că această lucrare este rezultatul
propriei activități intelectuale, pe baza cercetărilor mele și pe baza informațiilor obținute
din surse care au fost citate, în textul lucrării, și în bibliografie.

Declar, că această lucrare nu conține porțiuni plagiate, iar sursele bibliografice au
fost folosite cu respectarea legislației române și a convențiilor internaționale privind
drepturile de autor.

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

În cazul constatării ulterioare a unor declarații false, voi suporta sancțiunile
administrative, respectiv, *anularea examenului de licență*.

Data

01.07.2024

Prenume NUME

Răzvan-Ioan BOTEZAT

(semnătura)



SINTEZA

proiectului de diplomă cu titlul:

Proiectarea, Implementarea și dezvoltarea unui Sistem de Control pentru un Stand Experimental Bilă-Masă

Autor: **Răzvan-Ioan BOTEZAT**

Conducător științific: **Conf.dr.ing. Roxana RUSU-BOTH**

1. Cerințele temei:

În această lucrare se dorește proiectarea și implementarea unui stand experimental de tipul bilă-masă prevăzut cu sistem de control configurabil. Acesta va fi utilizat pentru proiectarea și testarea diferitelor metode de control care să asigure atât stabilizarea unei bile pe o suprafață plană, cât și compensarea deplasării bilei datorită posibilelor interacțiuni umane sau perturbări ale mediului.

2. Soluții alese:

Pentru realizarea standului experimental de tipul bilă-masă s-a ales o variantă prevăzută cu 2 servomotoare, pentru manipularea poziției mesei pe axa X și Y, și o placă rezistivă de dimensiunea 177x136 mm pentru determinarea în timp real a poziției bilei. Ca variante de control s-au proiectat și implementat metode de control clasic PID.

3. Rezultate obținute:

Pe parcursul realizării acestui proiect s-a reușit: proiectarea și implementarea unui stand de tip bilă-masă funcțional, determinarea și validarea unui model matematic al procesului de tip MIMO, proiectarea și implementarea a 2 variante de regatoare de tip PID capabile să asigure o eroare staționară la poziție 0 și un timp de stabilizare mai mic de 10 secunde.

4. Testări și verificări:

În etapa de testare s-a realizat, într-o primă fază, testarea funcționării corespunzătoare a actuatorilor și senzorilor, urmată de testarea întregului sistem, finalizând cu testarea diferitelor variante de control proiectate atât la nivel de simulare, cât și pe standul experimental.

5. Contribuții personale:

Ca și contribuții personale se pot enumera: studiul sistemelor de tip bilă-masă, proiectarea și realizarea componentelor mecanice ale sistemului experimental, alegerea componentelor hardware și realizarea conexiunilor necesare, proiectarea și



implementarea sistemului software, realizarea modelului matematic utilizând metode de identificare experimentală, validarea modelului pe baza datelor preluate din sistem, proiectarea și implementarea sistemului de control de tip PID.

6. Surse de documentare:

Sursele de documentare sunt diverse, începând de la cărți de automatică, lucrări științifice prezentate la conferințe de specialitate sau în jurnale, incluzând și site-uri specializate și video-uri descriptive despre subiectul abordat.

Semnătura autorului

Semnătura conducătorului științific

1	INTRODUCERE.....	2
1.1	CONTEXT GENERAL	2
1.2	OBIECTIVE.....	3
1.3	SPECIFICAȚII	4
2	STUDIU BIBLIOGRAFIC.....	6
2.1	SISTEME DE TIPUL BILĂ- MASĂ.....	6
2.1.1	<i>Clasificare in funcție de traductorul folosit</i>	<i>6</i>
2.1.2	<i>Clasificare in funcție de numărul de actuatori</i>	<i>8</i>
2.2	METODE DE CONTROL	9
2.3	SOLUȚIE PROPUȘĂ	14
3	ANALIZĂ SI PROIECTARE	15
3.1	ANALIZA HARDWARE SI COMPONENTE	15
3.1.1	<i>Placă rezistivă</i>	<i>16</i>
3.1.2	<i>Surse de tensiune</i>	<i>17</i>
3.1.3	<i>Servomotor de tip MG966R.....</i>	<i>18</i>
3.1.4	<i>Microcontroler (MC).....</i>	<i>19</i>
3.1.5	<i>Filtre RLC</i>	<i>20</i>
3.2	ANALIZA MECANICĂ	22
3.3	PROIECTAREA STANDULUI EXPERIMENTAL DE TIP BILA-MASA.....	24
3.4	ANALIZA SOFTWARE	28
3.4.1	<i>Comanda servomotor</i>	<i>29</i>
3.4.2	<i>Citire poziție bilă utilizând placa rezistivă</i>	<i>29</i>
3.4.3	<i>Sistem de control pozitie bila</i>	<i>30</i>
4	IMPLEMENTARE SI TESTARE.....	32
4.1	REALIZAREA STANDULUI EXPERIMENTAL DE TIP BILA-MASA.....	32
4.2	SISTEMUL DE DETERMINARE AL POZITIEI BILEI	34
4.2.1	<i>Implementare.....</i>	<i>34</i>
4.2.2	<i>Testare cu rezultate</i>	<i>35</i>
4.3	SISTEMUL DE COMANDA AL POZITIEI MESEI	36
4.3.1	<i>Implementare.....</i>	<i>36</i>
4.3.2	<i>Testare cu rezultate</i>	<i>37</i>
4.4	DETERMINAREA MODELULUI MATEMATIC	38
4.5	IMPLEMENTAREA SISTEMULUI DE CONTROL.....	40
4.5.1	<i>Regulator experimental</i>	<i>40</i>
4.5.2	<i>Regulator cu avans de faza.....</i>	<i>41</i>
4.5.3	<i>Implementarea funcțiilor pe Arduino.....</i>	<i>43</i>
4.6	TESTAREA STANDULUI EXPERIMENTAL DE TIP BILĂ-MASĂ.....	45
4.6.1	<i>Scenariu 1 – mentinere la punct fix.....</i>	<i>45</i>
4.6.2	<i>Scenariu 2 – mentinerea unei traiectorii</i>	<i>46</i>
5	CONCLUZII.....	48
5.1	REZULTATE OBȚINUTE.....	48
5.2	DIRECȚII DE DEZVOLTARE.....	48
6	REFERINȚE BIBLIOGRAFICE.....	50

1 Introducere

1.1 Context general

Domeniul de control al sistemelor este unul de actualitate al zilelor noastre datorită evoluției tehnologice rapide și dorinței omenești de productivitate și siguranța utilizării proceselor industriale. Scopul principal al unui sistem de control este de a influența variabilele de ieșire ale unui sistem pentru a se apropia cât mai mult posibil de anumite valori de referință sau de a urma anumite criterii de performanță, aceasta fiind și subiectul acestui proiect.

Această temă a fost aleasă din dorința de a încerca integrarea într-un proiect bine definit a tuturor materiilor asimilate pe parcursul facultății, cum ar fi: modelarea proceselor, teoria sistemelor, ingineria reglării automate, etc. Prin această temă există posibilitatea folosirii cunoștințelor acumulate și testarea lor fizic pe standul experimental.

Interacțiunea între partea de modelare și cea de implementare propriu-zisă aduce un aport de înțelegere mult mai profundă a conceptelor teoretice care stau în spatele domeniului studiat.

O altă justificare pentru tema aleasă este aria foarte largă de testare a diferitelor metode și tipuri de regulatoare pentru a aduce sistemul la stabilitate. Se pot compoza de la cei mai simpli algoritmi de control: metoda Guillian-Truxal, metoda Zigler-Nichols, alocare de poli, LQR, etc. până la algoritmi mai avansați de control, MPC (modele predictive de control).

Prin analiza pieței de proiecte ingineresti s-a constatat existența unor proiecte similare în categoria sistemelor de control. Majoritatea acestor proiecte sunt dificil de găsit și, în general, nu sunt disponibile în spațiul național. Pentru o perspectivă mai amplă asupra situației, Figura 1 prezintă un exemplu de astfel de proiect realizat de o firmă americană.

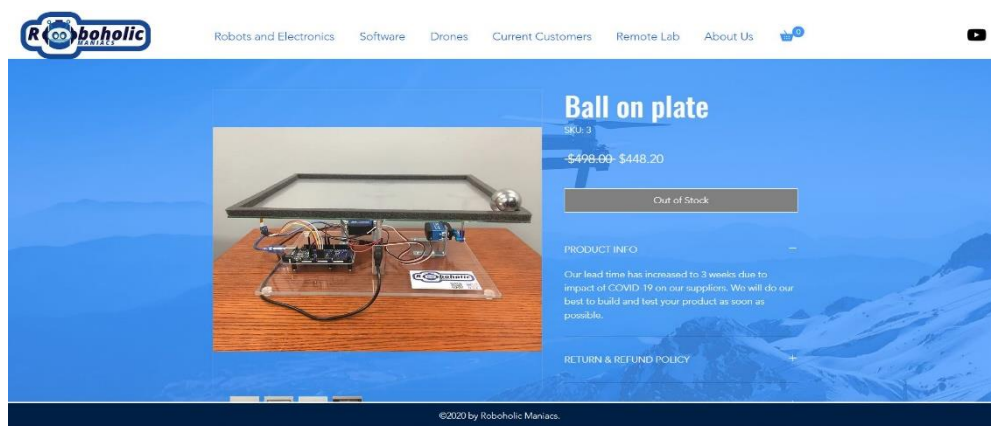


Fig.2.1.1. Sistem de tip bilă-masă [1]

Un alt avantaj al acestei teme de licență îl reprezintă costul redus necesar realizării unui astfel de proiect. Conform unei estimări preliminare a costurilor asociate standului experimental descris în acest document, bugetul necesar ar putea fi de până la 10 ori mai mic în comparație cu exemplul prezentat în Fig. 2.1.1.

Lucrarea bilă-masă este văzută ca un proces instabil și non-liniar acționat electric și mecanic. Face parte din categoria proiectelor de control al sistemelor, fiind în categoria proceselor didactice de referință din sfera automatizării împreună cu pendulul inversat. Este un proiect foarte promițător și provocator deoarece este foarte instabil în buclă deschisă și unde există o interacțiune strânsă între cele 2 intrări și ieșiri ale sistemului.

În acest proiect, va fi prezentată proiectarea structurii, care include realizarea pieselor în mediul Fusion 360, urmată de imprimarea 3D a acestora, îmbinarea pieselor din plastic și asamblarea standului pentru susținerea lucrării de licență.

Poziția mesei standului de tip bilă-masă este controlată cu două servomotoare, utilizând un microcontroler de tip Arduino. Masa este prevăzută cu un traductor de poziție, o placă rezistivă cu patru fire, pe care este situată bila de metal, și care transmite coordonatele X și Y (reprezentând poziția bilei) către microcontroler.

Pentru determinarea modelului matematic al procesului, necesar în etapa de dezvoltare a sistemului de control al poziției bilei s-au utilizat metode de identificare experimentală considerând un semnal de comandă format din succesiuni de impulsuri dreptunghiulare modulate în amplitudine. Chiar dacă majoritatea lucrărilor științifice pe acest subiect din cadrul revistelor și conferințelor de specialitate abordează problema realizării unui model matematic al procesului pe cale analitică prin prelucrarea matematică a ecuațiilor de bilanț de materiale, energie, impuls etc. [2], în acest proiect s-a ales o abordare experimentală datorită complexității calculelor implicate. Validarea modelului matematic s-a realizat ulterior utilizând date experimentale preluate de pe standul dezvoltat. Atât în etapa de determinare și validare a modelului matematic pentru sistemul de tip bilă-masă cât și în etapa de proiectare a sistemului de control al poziției bilei s-a utilizat mediul Matlab/SIMULINK. În etapa de proiectare a sistemului de control al poziției bilei în planul xOy s-au utilizat multiple metode iar performanțele au fost testate la nivel de simulare. Doar sistemele de control cu cele mai bune performanțe s-au implementat pe microcontroler și testat pe standul experimental.

În capitolul 1 se realizează o descriere a proceselor de automatizare și se enunță obiectivele proiectului. Capitolul 2 este dedicat unui studiu asupra literaturii de specialitate, analizând cercetările anterioare din mediul academic pentru a identifica direcții de dezvoltare pentru standul experimental. În capitolul 3 se efectuează analiza mecanică, software și hardware a sistemului. Capitolul 4 prezintă implementarea și testarea reguletoarelor dezvoltate. Capitolul 5 conține concluziile rezultate din implementarea și testarea proiectului.

1.2 Obiective

Obiectivul principal al prezentei lucrări constă în conceperea și realizarea unui stand experimental tip bilă-masă, precum și proiectarea, implementarea și evaluarea unui sistem de control capabil să mențină poziția bilei stabilă, chiar și în condiții de perturbații externe.

Dintre obiectivele secundare se pot enumera:

- Fabricația și manufacturarea componentelor structurale prin imprimare 3D reprezintă un aspect crucial în dezvoltarea sistemului bilă-masă. Aceste componente trebuie să fie proiectate și realizate cu atenție pentru a asigura stabilitatea și fiabilitatea întregului sistem. Utilizarea tehnologiei de imprimare 3D permite realizarea de componente complexe, adaptate necesităților specifice ale sistemului, cu un grad ridicat de precizie și reproductibilitate.
- Selecția riguroasă a componentelor electronice și de control este un proces esențial în construirea unui sistem funcțional și eficient. Aceste componente trebuie să fie compatibile între ele și să satisfacă cerințele tehnice ale sistemului. Aspecte precum performanța, fiabilitatea și disponibilitatea pe piață sunt critice în procesul de selecție.
- Elaborarea unui model matematic al sistemului pe baza datelor experimentale obținute de pe standul experimental este importantă pentru înțelegerea comportamentului sistemului și pentru proiectarea unui sistem de control adecvat.
- Conceperea unui sistem de control bazat pe un regulator PID clasic implică dezvoltarea și testarea mai multor variante de regulatoare PID, utilizând diferite metode de acordare. Alegerea unei metode de acordare adecvate este crucială pentru obținerea performanțelor dorite ale sistemului. În funcție de rezultatele obținute, se poate lua în considerare proiectarea și testarea unor regulatoare de control avansate.
- În final, implementarea sistemelor de control pe microcontrolere executate în mod discret și analiza datelor colectate în urma testării reguletoarelor pe standul experimental sunt etape esențiale pentru validarea și optimizarea sistemului de control. Aceste date vor oferi informații importante pentru îmbunătățirea performanței și fiabilității sistemului în condiții reale de utilizare.

1.3 Specificații

În această secțiune vor fi detaliate specificațiile proiectului și toate funcționalitățile necesare care trebuie realizate. Obiectivul principal fiind dezvoltarea unui stand experimental de tipul bilă-masă, acesta trebuie să fie prevăzut cu un sistem de control configurabil care să fie capabil să stabilizeze bila într-un punct dorit în planul xOy al mesei sau pe o traiectorie impusă.

Capacitatea sistemului de a menține bila pe o traiectorie impusă de tipul cerc sau pătrat implică dezvoltarea și implementarea unor algoritmi specializați care să permită sistemului să răspundă adecvat la schimbările de traiectorie.

Stabilizarea bilei într-un punct impus în planul mesei implică determinarea unui model matematic liniar al sistemului, validarea acestuia și proiectarea și implementarea unor regulatoare clasice de tip PID prin diferite metode de acordare.

O problemă frecventă în implementarea reguletoarelor este reprezentată de erorile de măsură ale senzorului, care pot afecta performanțele sistemului. Pentru a gestiona aceste erori, se pot utiliza tehnici de filtrare sau de compensare a acestora, asigurând astfel o mai mare precizie și stabilitate a sistemului.

Sistemul de control trebuie să permită implementarea și testarea atât a reguletoarelor clasice de tip PID, cât și a unor reguletoare avansate: robuste, predictive etc.

Pentru a realiza o implementare eficientă a regulatorului PID, este necesară adaptarea acestuia pentru a funcționa atât în mod discret, cât și continuu, pe un microcontroler. Alegerea unei rate de eșantionare adecvate și optimizarea algoritmului de control sunt aspecte esențiale în acest proces.

În plus, în funcție de cerințele sistemului, poate fi necesară implementarea unor tehnici de control avansate, care să asigure o performanță superioară în anumite condiții de operare sau în prezența unor perturbații semnificative. Integrarea acestor tehnici avansate în structura de control poate contribui semnificativ la îmbunătățirea performanțelor sistemului în ansamblu.

2 Studiu bibliografic

În acest capitol se vor analiza diferite implementări/variante ale sistemului de tip bilă-masă, urmărindu-se în special avantajele/dezavantajele fiecăruia, cu scopul de a propune o soluție de implementare cât mai fiabilă, configurabilă și în același timp economică. De asemenea, se vor studia diferitele variante de control potrivite pentru stabilizarea bilei pe masă, chiar și în prezența unor posibile perturbații.

2.1 Sisteme de tipul bilă- masă

După o analiză extensivă a articolelor de cercetare se poate concluziona că poziționarea unei bile într-un punct dat și menținerea acesteia în fața diferitelor perturbații, atât externe cât și interne, se poate realiza cu mai multe tipuri de structuri.

În prezent, se pot realiza două clasificări ale sistemelor de tip bilă-masă. Prima clasificare este în funcție de traductorul utilizat pentru calcularea poziției bilei: cu cameră video sau placă rezistivă. Al doilea criteriu este bazat pe numărul de actuatori folosiți pentru inclinarea suportului pe care este așezată bila. Acesta poate fi echipat cu 2, 3 sau chiar 6 servomotoare.

2.1.1 Clasificare în funcție de traductorul folosit

Camera oferă o urmărire precisă a poziției bilei, permițând un control exact. Aceasta permite implementarea unor algoritmi avansați de control, cum ar fi metodele de control bazate pe imagine și adaptative. Feedback-ul vizual în timp real facilitează diagnosticarea și ajustarea rapidă a sistemului. Sistemul este ușor de extins pentru a include caracteristici suplimentare, cum ar fi recunoașterea formei sau a culorii, fără modificări majore ale hardware-ului. De asemenea, servește ca un excelent instrument educațional pentru învățarea principiilor de control automat și procesare a imaginii.

Ca dezavantaje, sistemul necesită cunoștințe avansate în procesarea imaginii și programare, ceea ce crește complexitatea implementării. Camerele de înaltă calitate și hardware-ul necesar pentru procesare pot fi costisitoare. Performanța poate fi afectată de condițiile de iluminare, reflexii și alte interferențe optice. Procesarea imaginilor în timp real necesită o putere de calcul semnificativă, ceea ce poate cauza întârzieri. De asemenea, este necesară calibrarea regulată pentru a menține acuratețea.



Figure 2.1.1.1 Model bilă-masă cu cameră video [3]

Pentru senzorul de tip placă rezistivă, simplitatea acestui sistem îl face mai ușor de implementat în comparație cu sistemele bazate pe cameră, necesitând cunoștințe de bază în senzori rezistivi și control. Costurile sunt mai reduse deoarece panourile rezistive și hardware-ul asociat sunt mai ieftine decât camerele de înaltă calitate și procesoarele de imagini. Sistemul este mai puțin afectat de condițiile de iluminare și interferențele optice, fiind astfel mai fiabil în diverse medii. Feedback-ul în timp real oferă răspunsuri imediate cu întârzieri minime în procesare, deoarece panourile rezistive măsoară direct poziția bazată pe punctele de contact. De asemenea, necesită calibrare la o frecvență mai redusă comparativ cu sistemele bazate pe cameră.

Ca dezavantaj, senzorul de tip placă rezistivă poate oferi o urmărire a poziției mai puțin precisă comparativ cu sistemele cu cameră, ceea ce poate reduce acuratețea controlului. Acesta nu suportă algoritmi avansați de control bazat pe imagine, limitând flexibilitatea în strategiile de control. Panourile rezistive pot suferi uzură în timp din cauza contactului fizic, afectând longevitatea și fiabilitatea. Scalarea sistemului sau adăugarea de funcții suplimentare poate necesita modificări semnificative ale hardware-ului. De asemenea, rezoluția datelor de poziție poate fi mai mică decât cea oferită de o cameră de înaltă rezoluție, afectând capacitatea sistemului de a face ajustări fine. Figura 2.1.1.2.

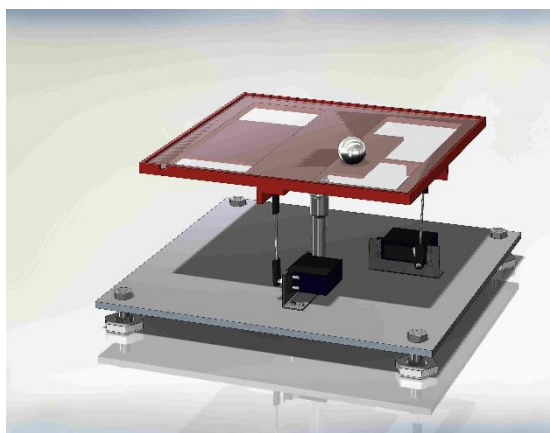


Figura 2.1.1.2 Model bilă-masă cu placă rezistivă [4]

2.1.2 Clasificare în funcție de numărul de actuatori

Pentru controlul bidimensional sau cel pe 2 axe, X și Y, se permite direcționarea bilei pe două direcții, oferind o flexibilitate bună în stabilizarea acesteia. Sistemul are o complexitate moderată, fiind mai avansat decât cel cu un singur servomotor, dar rămânând relativ simplu comparativ cu sisteme mai sofisticate. Costurile sunt rezonabile, mai mari decât cele ale unui sistem cu un singur servomotor, dar semnificativ mai mici decât cele ale sistemelor cu 3 sau 6 servomotoare.

Ca și dezavantaj, există limitări în precizie, fiind mai puțin precis decât sistemele cu un număr mai mare de servomotoare. De asemenea, se poate să fie necesară o sincronizare precisă între cele două servomotoare pentru a menține stabilitatea bilei. Figura 2.1.2.1

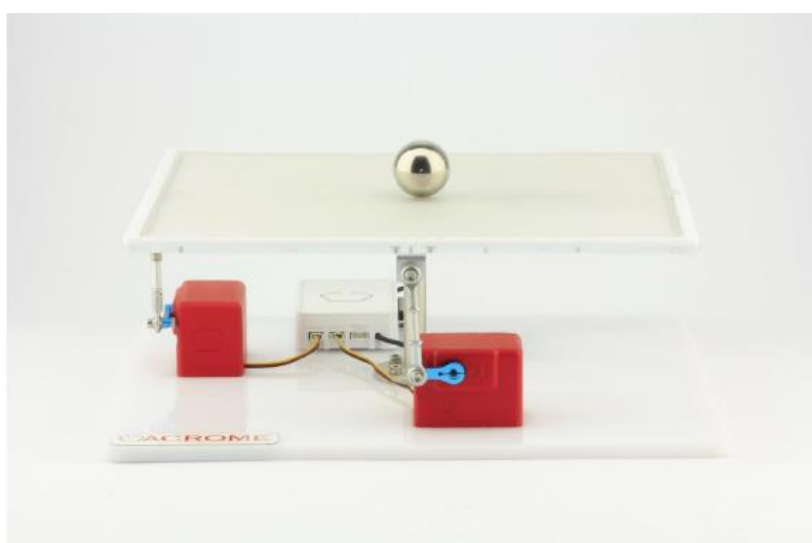


Figura 2.1.2.1 Sistem cu 2 servomotoare [5]

Acest sistem, în 3 puncte (de obicei în triunghi) distincte utilizează trei servomotoare pentru a controla înclinarea plăcii, ceea ce oferă o stabilitate și un control sporit al poziției bilei.

Controlul tridimensional permite o gestionare precisă a plăcii, asigurând o stabilitate îmbunătățită și o capacitate superioară de a menține bila în poziția dorită. Flexibilitatea crescută a sistemului permite efectuarea de ajustări fine și complexe, adaptându-se eficient la diverse perturbări. Comparativ cu sistemele cu două servomotoare, acesta oferă o stabilitate superioară datorită controlului pe trei puncte.

Dezavantajele constau în complexitatea ridicată a sistemului care este determinată de numărul crescut de servomotoare, necesitând cunoștințe avansate de control și programare. Costurile asociate sunt mai mari comparativ cu sistemele cu două servomotoare, atât în ceea ce privește achiziția hardware-ului, cât și întreținerea acestuia. Sincronizarea între cele trei servomotoare este complexă și necesită precizie avansată pentru a menține stabilitatea și performanța sistemului. Figura 2.1.2.2

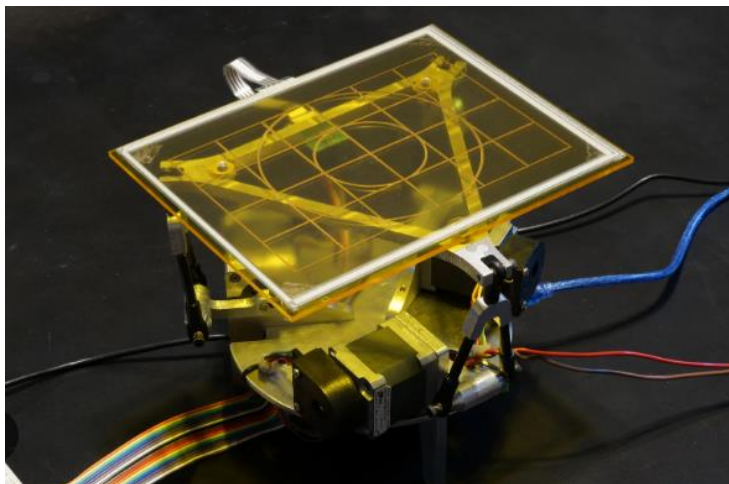


Figura 2.1.2.2 Sistem cu 3 servomotoare [6]

Sistemul cu 6 servomotoare asigură un control maxim al plăcii și bilei, permițând realizarea celor mai fine ajustări și răspunsuri rapide la perturbări. Stabilitatea excelentă este garantată de cele șase puncte de control, oferind o adaptabilitate superioară la condiții variabile. Versatilitatea acestui sistem îi permite să gestioneze sarcini complexe și să fie utilizat în aplicații avansate de cercetare și dezvoltare.

Complexitatea foarte mare a implementării și întreținerii acestui sistem necesită expertiză avansată în control automat și programare. Costurile sunt ridicate, atât pentru achiziția componentelor necesare, cât și pentru întreținerea sistemului. Sincronizarea și calibrarea sunt aspecte critice care necesită precizie și frecvență pentru a menține performanța optimă a sistemului. Figura 2.1.2.3

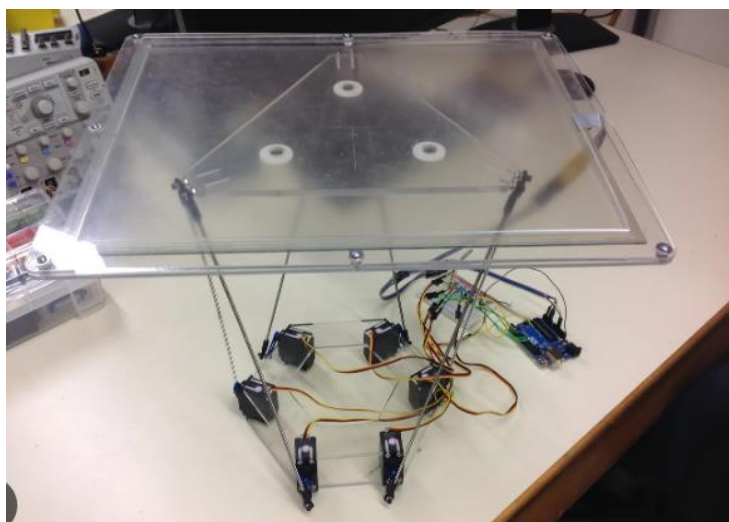


Figura 2.1.2.3 Sistem cu 6 servomotoare [7]

2.2 Metode de control

În capitolul de față, se vor prezenta diverse metode de control aplicate unui sistem de tip bilă-masă. Acest tip de sistem servește ca un benchmark esențial în evaluarea și

compararea performanțelor diferitelor strategii de control, subliniind astfel importanța crucială a dezvoltării și testării riguroase a acestor tehnici pentru a asigura stabilitatea și eficiența în aplicațiile practice.

Autorii David Di Ruscio și Christer Dalen în lucrarea intitulată "Tuning PD and PID Controllers for Double Integrating Plus Time Delay System" [8] au abordat diferite metode de control pentru un sistem cu aceeași structură ca și standul experimental, cu excepția timpului mort. Acest studiu reprezintă un început promițător pentru găsirea unui controler adecvat pentru funcționarea standului experimental de tip bila-masă.

O prima metodă de control constă în algoritmul de reglare PD pentru sisteme cu dublă integrare și întârziere în timp (DIPTD) este o extensie a metodologiei PI utilizată pentru sisteme cu integrare și întârziere în timp (IPTD). Acest algoritm transformă parametrii proporționali și integrali specifici controlerelor PI în parametri specifici pentru controlere PD, asigurând stabilitatea și performanța optimă a sistemului DIPTD.

Sistemele DIPTD sunt modelate ca având o funcție de transfer de forma:

$$G(s) = \frac{K}{s^2} e^{-\theta s} \quad (1)$$

unde K este câștigul sistemului, θ (theta) este întârzierea în timp, iar s este variabila Laplace. Parametrul α este calculat în funcție de β și c.

Determinarea parametrilor unui controler PD pentru sisteme cu dublă integrare și întârziere în timp (DIPTD) se realizează urmărind un număr de pași. În primul rând, se definește parametrul de produs c bazat pe cerințele de performanță și robustețe. Parametrul de produs c este un factor ce controlează echilibrul între performanța sistemului și robustețea acestuia la variațiile parametrilor sistemului și la perturbări externe. Apoi, se calculează valoarea parametrului β (beta) în funcție de marja de întârziere relativă δ (delta). Parametrul β este determinat ca o funcție liniară a marjei de întârziere relativă, exprimată prin relația:

$$\beta = \delta \left(1 + \frac{T_d}{\theta} \right) \quad , \quad (2)$$

unde θ este întârzierea în timp a sistemului și T_d este timpul derivativ.

În continuare, se determină valoarea parametrului α folosind relația:

$$\alpha = \frac{c}{\beta} \quad (3)$$

După ce s-au calculat valorile parametrilor α și β , se poate determina câștigul proporțional K_p și timpul derivativ T_d pentru controlerul PD utilizând relațiile:

$$K_p = \alpha K, \quad T_d = \frac{\beta \theta}{\alpha}, \quad T_i = \gamma T_d \quad (4)$$

unde K este câștigul sistemului

Ca si avantaje, avem performanță optimizată prin utilizarea unei relații de tipul $T_i = \gamma T_d$ în tuningul PID asigură un răspuns optim al sistemului. Această relație permite adaptarea constantei de integrare T_i în funcție de constanta de derivare T_d , ceea ce

contribuie la obținerea unui control precis și la minimizarea erorilor pe termen lung. În contextul controlerului PD, reglarea parametrilor α și β oferă o performanță optimizată prin echilibrarea câștigului proporțional și a componentei derivate.

Flexibilitate: Metoda de reglare este flexibilă, permițând ajustarea factorului γ pentru a obține diverse caracteristici de răspuns ale sistemului. Acest lucru este deosebit de util în aplicațiile unde cerințele de performanță pot varia. Ajustarea parametrului de produs c în controlerul PD permite, de asemenea, modificarea caracteristicilor de răspuns pentru a satisface diferite cerințe de performanță și robustețe.

Implementare Demonstrată: Algoritmii propuși pentru reglarea controlerelor PD și PID au fost validați prin simulări MATLAB, care demonstrează eficiența acestora. Simulările arată că acești algoritmi sunt capabili să mențină stabilitatea sistemului și să asigure o performanță superioară în diverse scenarii de operare.

Ca și dezavantaje, enumerăm complexitatea algoritmului PID este mai complex decât cel PD, necesitând mai multe calcule și o înțelegere profundă a dinamicii sistemului. Reglarea PID implică determinarea simultană a trei parametri (proporțional, integral și derivativ), ceea ce poate fi o provocare comparativ cu reglarea PD, care implică doar doi parametri. Această complexitate suplimentară poate crește timpul și resursele necesare pentru implementare.

Dependența de parametrii Sistemului: Precizia reglării depinde de estimarea corectă a parametrilor sistemului. În cazul în care parametrii sunt estimați incorect, performanța controlerului poate fi afectată negativ. Pentru sisteme DIPTD, estimarea precisă a parametrilor precum câștigul sistemului K , timpul de întârziere θ , și constanta de timp derivativ T_d este esențială pentru o reglare eficientă. Orice erori în estimarea acestor parametri pot duce la un control ineficient și la instabilitatea sistemului.

Aceste metode de reglare PD și PID sunt esențiale pentru asigurarea stabilității și performanței optime a sistemelor cu dublă integrare și întârziere în timp (DIPTD). Implementarea lor necesită cunoștințe aprofundate în teoria controlului și o bună înțelegere a dinamicii sistemului. În concluzie, deși algoritmi de reglare PD și PID prezintă unele provocări, avantajele lor în ceea ce privește optimizarea performanței și flexibilitatea le fac instrumente valoroase în ingineria de control.

A doua metodă utilizată de David Di Ruscio și Christer Dalen [8] pentru determinarea reglatoarelor necesare este metoda Ziegler-Nichols.

Conform metodei Ziegler-Nichols, se presupune că sistemul ajunge la limita de stabilitate și intră într-o oscilație continuă, menținută. Acest proces permite deducerea a doi parametri esențiali necesari dezvoltării ulterioare a reglatoarelor de tip PID.

Primul parametru dedus este $K_{critica}$, care reprezintă factorul de amplificare necesar pentru a induce sistemul în modul oscilației continue menținute. Acesta este valoarea câștigului proporțional la punctul în care sistemul începe să oscileze continuu.

Al doilea parametru este $P_{critica}$, care indică perioada dintre două puncte consecutive de maxim ale oscilației continue menținute. Această perioadă reprezintă timpul necesar pentru ca sistemul să parcurgă un ciclu complet de la un maxim la altul.

Acești doi parametri sunt esențiali în determinarea parametrilor optimi ai reguletoarelor PID pentru a asigura o performanță stabilă și eficientă a sistemului în buclă închisă.

Ca și avantaj, este una dintre cele mai simple și utilizate metode de reglare PID, fiind ușor de implementat. Aceasta nu necesită cunoștințe aprofundate în teoria controlului, ci doar câțiva pași simpli pentru a determina parametrii PID. Această simplitate o face accesibilă pentru inginerii și tehnicienii din industrie care doresc să regleze rapid și eficient sistemele de control.

Metoda este folosită pe scară largă în industrie pentru o gamă variată de sisteme de control, de la procese chimice la automatizări mecanice. Datorită versatilității sale, metoda Ziegler-Nichols poate fi aplicată în diverse domenii fără a necesita modificări semnificative ale algoritmului de bază.

Permite reglarea rapidă a parametrilor PID prin teste de răspuns în buclă închisă. Prin determinarea punctului de oscilație și ajustarea corespunzătoare a parametrilor, controlerul PID poate fi configurat într-un timp scurt. Acest lucru este deosebit de valoros în medii industriale unde timpul este un factor critic.

Ca și dezavantaj, metoda Ziegler-Nichols poate să nu ofere performanța optimă pentru sisteme cu întârziere mare sau dinamici complexe, cum ar fi sistemele cu dublă integrare și întârziere în timp (DIPTD). Aceasta este pentru că metoda se bazează pe un set de reguli fixe care nu iau în considerare particularitățile fiecărui sistem în parte. În astfel de cazuri, metoda poate necesita ajustări suplimentare pentru a îmbunătăți performanța.

Implementarea metodei Ziegler-Nichols poate induce oscilații în sistem, mai ales în cazul sistemelor instabile sau cu întârziere mare. Aceste oscilații apar deoarece metoda ajustează parametrii PID pentru a atinge punctul de oscilație susținut, ceea ce poate duce la un comportament oscilatoriu nedorit în timpul funcționării normale a sistemului.

Metoda este sensibilă la schimbările în dinamica sistemului și la perturbări externe. În cazul în care parametrii sistemului se modifică în timp sau dacă apar perturbări neașteptate, performanța controlerului reglat prin metoda Ziegler-Nichols poate scădea semnificativ. Aceasta necesită recalibrarea frecventă a parametrilor pentru a menține performanța optimă, ceea ce poate fi impracticabil în medii industriale dinamice.

Reglarea PID reprezintă o soluție eficientă și rapidă pentru reglarea sistemelor de control în diverse aplicații industriale datorită simplității și ușurinței de implementare. Cu toate acestea, limitările sale în ceea ce privește precizia, oscilațiile induse și robustețea scăzută față de schimbările în dinamica sistemului și perturbări externe, o fac mai puțin adecvată pentru sistemele complexe, cum ar fi cele cu dublă integrare și întârziere în timp (DIPTD). De aceea, în astfel de cazuri, poate fi necesar să se folosească metode de reglare mai avansate sau să se efectueze ajustări suplimentare pentru a îmbunătăți performanța și stabilitatea sistemului.

O altă metodă de control pentru sistemul de tip bilă-masă constă în algoritmul Skogestad, mai precis Internal Model Control (SIMC) [8]. Aceasta este o metodă de acordare a controlerelor PID bazată pe reguli analitice simple derivate din cadrul modelului intern de control. Metoda SIMC urmărește să simplifice proiectarea controlerului, oferind în același timp performanțe și robustețe bune. Este deosebit de utilă pentru sistemele de tip prim-ordin cu întârziere de timp (FOPTD), dar poate fi adaptată și pentru procese de ordin superior.

SIMC utilizează un model simplu al procesului pentru a deriva regulile de reglare. Forma tipică este un model de ordin întâi cu întârziere de timp (FOPTD):

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (5)$$

unde K este câștigul procesului, θ este întârzierea de timp, iar τ este constanta de timp.

Controlerul PID este proiectat pe baza parametrilor modelului procesului. Regulile de reglare SIMC sunt directe și implică stabilirea parametrilor controlerului (câștigul proporțional K_p , timpul de integrare T_i , și timpul de derivare T_d).

Regulile de reglare depind de constanta de timp a buclei închise dorite (T_c), care este aleasă pe baza dinamicii procesului și a cerințelor de performanță. Pentru un proces de ordin întâi cu întârziere de timp, regulile SIMC sunt:

$$K_p = \frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} \cdot \frac{1}{\left(\frac{T_c}{\theta} + 1 \right)} \right) \quad (6)$$

Metoda SIMC oferă un echilibru între performanță și robustețe. Prin ajustarea lui T_c , utilizatorul poate face un compromis între un răspuns mai rapid (cu T_c mai mic) și o robustețe mai mare (cu T_c mai mare).

Algoritmul de reglare SIMC (Skogestad Internal Model Control) este apreciat pentru simplitatea și ușurința de implementare, oferind o metodă directă de reglare a controlerelor PI și PID, ceea ce îl face mai ușor de aplicat în comparație cu metodele mai complexe. Metoda SIMC oferă o performanță robustă prin asigurarea unei bune respingeri a perturbărilor și gestionării sarcinilor, fiind adecvată pentru o gamă largă de aplicații industriale. Aceasta tinde să ofere un echilibru optim între performanță și robustețe, asigurând un răspuns rapid al sistemului fără suprasarcină semnificativă sau instabilitate. Metoda SIMC este flexibilă, permițând ajustări pentru diferite niveluri de performanță și robustețe, astfel încât să fie adaptată nevoilor specifice ale aplicației. De asemenea, este deosebit de eficientă pentru procesele cu întârzieri semnificative, oferind o metodă sistematică de gestionare a acestor întârzieri în sistemele de control.

Ca și dezavantaje, metoda SIMC poate să nu performeze optim pentru sistemele foarte neliniare, unde presupunerile liniare ale metodei nu se aplică bine. Deși regulile SIMC oferă setări inițiale bune, acestea pot necesita ajustări suplimentare în practică, ceea ce poate fi un dezavantaj dacă este necesară o soluție optimă imediată, fără ajustări manuale. Eficiența reglării SIMC depinde de cunoașterea exactă a parametrilor procesului. Dacă parametrii nu sunt bine înțeleși sau dacă procesul variază semnificativ, performanța controlerului poate scădea. Parametrii de reglare sunt adesea conservatori pentru a

asigura robustețea, ceea ce poate rezulta într-un răspuns mai lent al sistemului în comparație cu metodele de reglare mai agresive. Deși SIMC este versatil, există tipuri specifice de procese (de exemplu, cele cu interacțiuni dinamice complexe) pentru care alte metode de reglare ar putea oferi o performanță mai bună.[8]

2.3 Soluție propusă

În urma analizei soluțiilor prezentate, s-a decis utilizarea unei structuri formate dintr-un panou rezistiv ca traductor, controlată de două servomotoare, pentru dezvoltarea standului experimental. Această opțiune a fost aleasă datorită simplității sale de implementare și a adecvării pentru modelul de reglare dorit. Sistemul cu panou rezistiv și două servomotoare oferă un echilibru optim între complexitate și funcționalitate. Este relativ simplu de implementat și nu necesită cunoștințe avansate de programare sau control automat. De asemenea, costurile asociate cu achiziția și întreținerea acestui sistem sunt moderate, fiind semnificativ mai mici comparativ cu soluțiile care implică un număr mai mare de servomotoare sau utilizarea unor camere de înaltă rezoluție.

Pentru controlul acestui sistem, s-au selectat algoritmi inovatori, care nu au fost anterior utilizați pentru acest tip de proiect. Alegerea acestor algoritmi are scopul de a optimiza performanțele sistemului și de a aduce contribuții noi în domeniul controlului automat.

O prima varianta de acordare a parametrilor reguletoarelor necesare se bazează pe o abordare iterativă – prin încercări, în care sistemul ajustează în mod repetat parametrii de control pe baza feedback-ului obținut, până când se atinge performanța dorită. Metoda este robustă și poate gestiona variabilitatea sistemului și a condițiilor de operare. Implementarea prin încercări permite adaptarea rapidă și eficientă la perturbări și modificări ale sistemului.

A doua variantă de control propusă constă în acordarea unui compensator cu avans de fază, utilizat pentru a îmbunătăți răspunsul dinamic al sistemului. Acesta ajustează faza și amplificarea semnalului de control, contribuind la reducerea erorilor și la creșterea stabilității sistemului. Implementarea acestui tip de compensator poate duce la o performanță superioară în termeni de rapiditate și precizie a răspunsului sistemului la comenzi și perturbări.

3 Analiză și proiectare

3.1 Analiza hardware și componente

În această secțiune se vor prezenta și detalia componentele hardware folosite pentru dezvoltarea standului experimental de tip bila-masa. Aceste componente au fost alese având în vedere costul minim, dar performanța și funcționalitățile necesare.

Structura hardware a proiectului integrează un microcontroler, o placă rezistivă și 2 servomotoare, precum și o sursă mică de alimentare de 5V. Doar cele 2 motoare sunt alimentate de la o sursă externă, iar placa rezistivă este alimentată de microcontroler. Pentru a se putea realiza stabilizarea mingii, primul pas este ca placa să se poată înclina pe cele 2 axe. Acest lucru este realizat de partea mecanică explicată mai jos.

Cea mai importantă parte o reprezintă cea de feedback către microcontroler în care ecranul rezistiv transmite mereu poziția bilei pe placă în numere ce pot fi ulterior convertite în unitatea de măsură dorită, cum ar fi milimetri. Microcontrolerul interpretează datele primite și, cu ajutorul unui regulator de tip PID, transmite către servo comenzi în grade, mai exact prin utilizarea unui PWM. S-a ales ca motoarele să fie alimentate de la o sursă auxiliară deoarece acestea în timpul funcționării consumă mult curent pe care microcontrolerul nu îl poate furniza în totalitate și există riscul să apară multe erori de citire ale datelor de la senzor.

În figura 3.1 regăsim structura simplificată a modelului hardware, împreună cu traseul datelor de la fiecare componentă în parte.

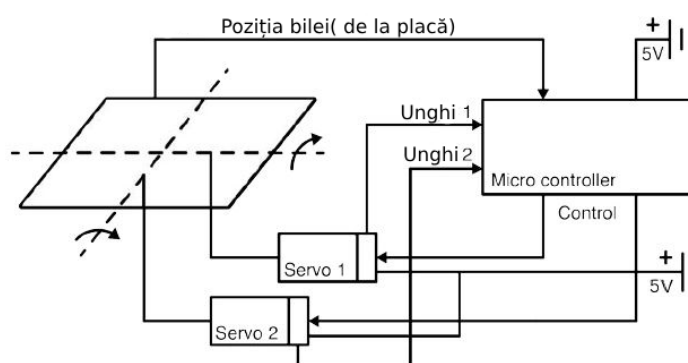


Figura 3.1 Structura simplificată a modelului hardware

Lista componentelor folosite conține:

- Placă de dezvoltare compatibilă Arduino Nano v3
- Pentru 2.1 și 2.2 sunt 2 servo-motoare de tipul MG996R

- DMC AST-084A080A 8.4inch, placa rezistiva cu 4 fire 177 x 136mm
- 4.1-alimentare 9V, 4.2-sursa de alimentare de 3.3-5v
- Breadboard 400 puncte
- 2 condensatori 1nF pentru filtrare

3.1.1 Placă rezistivă

Pentru partea de feedback s-a utilizat o placă rezistivă pentru determinarea poziției bilei în coordonate carteziane.

În momentul de față pe piața electronicelor există doar 2 tipuri de ecrane: rezistive și capacitive. Cele mai folosite sunt display-urile capacitive. Acestea dispun de o singură suprafață care se regăsește pe panou și care este încărcată electric. În momentul atingerii unei zone, se produce o descărcare electrică în acea zonă prin corpul utilizatorului. Acea diferență de sarcină electrică se poate măsura cu circuite integrate speciale care se află în colțurile suprafeței și prin care se deduc coordonatele atingerii ecranului. Ca avantaje, luminozitate bună și foarte sensibil la atingere. Dezavantajele ecranului capacitive constau în consum mare de energie, necesită corp conductor de sarcină electrică pentru a funcționa și tehnologie mult mai scumpă.

În proiectul actual, alegerea ecranului rezistiv, deși mai puțin întâlnit în tehnologia modernă, este justificată de capacitatea sa unică de a detecta poziția oricărui obiect, indiferent dacă acesta este sau nu conducător de curent. Acest aspect face ecranele rezistive ideale pentru aplicații unde utilizatorii interacționează cu diverse obiecte, inclusiv cu degetele sau chiar mânuși.

Deși ecranele rezistive nu oferă aceeași sensibilitate și răspuns rapid ca tehnologia capacitive predominantă în prezent, ele sunt preferate în anumite medii și aplicații. De exemplu, în domeniul industrial sau medical, unde utilizarea de mânuși poate fi necesară pentru protecție, ecranele rezistive asigură o interacțiune consistentă și precisă fără a fi afectate de stratul protector al mânușilor.

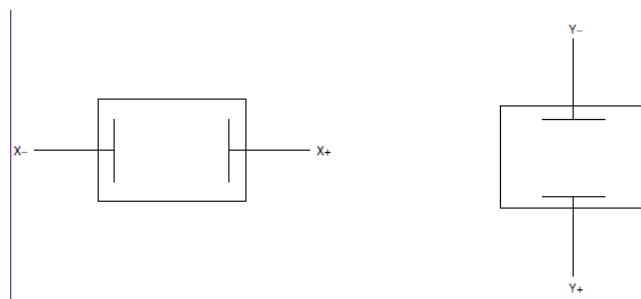


Fig. 3.1.1.1 Planul xOy al plăcii rezistive [9]

Ecranele rezistive cu 4 fire sunt mai frecvent întâlnite. Acestea sunt formate din 2 plăci rezistive transparente cu rezistență uniformă și separate printr-un spațiu. Contactele metalice pentru axa X sunt dispuse paralel cu direcția Y, unde rezistența este

măsurată între două puncte de pe axa X. Similar, se realizează măsurători și pentru axa Y. Figura 3.1.1.1. [4]

În momentul în care placa este apăsată cu destulă forță (vezi Figura 3.1.1.2), se produce o deformare a stratului superior care intră în contact cu stratul inferior. La punctul de contact, stratul inferior separă stratul superior în două rezistențe în serie, iar în funcție de locul de contact, acesta funcționează ca un divizor de tensiune cu rezistență variabilă.

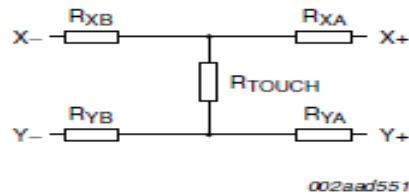


Fig. 3.1.1.2 Divizorul de tensiune format prin atingerea ecranului [9]

3.1.2 Surse de tensiune

Sursa de tensiune este un dispozitiv utilizat pentru a furniza o tensiune electrică constantă sau variabilă către un circuit sau un dispozitiv. Aceasta poate fi utilizată într-o varietate de aplicații, inclusiv în experimente de laborator, în dezvoltarea de prototipuri sau în aplicații industriale. Există mai multe tipuri de aceste surse. O scurtă clasificare poate să fie:

1. După tipul de tensiune produsă:
 - Sursă de curent continuu (DC): Furnizează o tensiune constantă sau variabilă de curent continuu.
 - Sursă de curent alternativ (AC): Furnizează o tensiune alternativă care variază în timp.
2. După capacitatea de reglare:
 - Surse reglabile: Permit ajustarea nivelului tensiunii de ieșire.
 - Surse fixe: Furnizează o tensiune constantă care nu poate fi modificată.
3. După tehnologia utilizată:
 - Sursă de alimentare liniară: Utilizează tranzistori de putere pentru a regla tensiunea de ieșire.
 - Sursă de alimentare cu comutare (SMPS): Utilizează comutatoare și transformatoare pentru a furniza tensiunea de ieșire.
4. După destinație:
 - Surse de laborator: Folosite în medii de laborator sau în dezvoltarea de prototipuri.
 - Surse industriale: Utilizate în aplicații industriale pentru alimentarea echipamentelor și a sistemelor.

În proiectul de față s-a utilizat ca sursă primară de alimentare un încărcător de 9Vcc fiind alimentat la 220Vca. Datorită faptului că cele două servo-motoare utilizate pentru controlul poziției mesei sistemului necesită doar 5V, s-a utilizat un convertor DC-DC coborâtor. Un convertor DC-DC buck este un dispozitiv electronic care reduce tensiunea de intrare la un nivel inferior, menținând în același timp eficiența energetică. Acesta funcționează prin comutarea rapidă a unei tensiuni de alimentare de înaltă frecvență, utilizând un comutator (de obicei un tranzistor) și un element de stocare a energiei (de obicei un inductor sau un condensator) pentru a regla și stabiliza tensiunea de ieșire.

3.1.3 Servomotor de tip MG966R

Servomotoarele sunt convertizoarele de viteză variabilă care sunt folosite pe scară largă în domeniile industriale și de automatizare. Acestea nu sunt o clasă specială de motoare, dar au fost realizate cu scopul de a reda mișcări cu o precizie mare. Ele pot fi găsite în componente ale frezelor (CNC - computer numerical control), în aplicații radar, în automatizare, dar și în construcția roboților.

Există 2 categorii mari de servomotoare: servomotoare de curent continuu și cele de curent alternativ. Pentru cele de curent alternativ există o subcategorie: de tip inducție și de tip sincron.

Servomotoarele de curent continuu sunt folosite pentru aplicații de control în care abaterea poziției poate să fie mare, față de cele de curent alternativ în care precizia este mult mai mare față de cele pe curent continuu.

În urma analizei fișei tehnice, s-a concluzionat că servomotorul de tip MG966R îndeplinește cerințele necesare pentru realizarea standului experimental. Au fost considerate următoarele specificații: tensiunea de alimentare cuprinsă între 3 și 5 V, viteza de rotație de 30 grade la fiecare 0.1 secunde și un cuplu motor de 8.5 kgf·cm.

În Figura 3.1.3.1 este reprezentat un exemplu de servomotor de curent continuu.

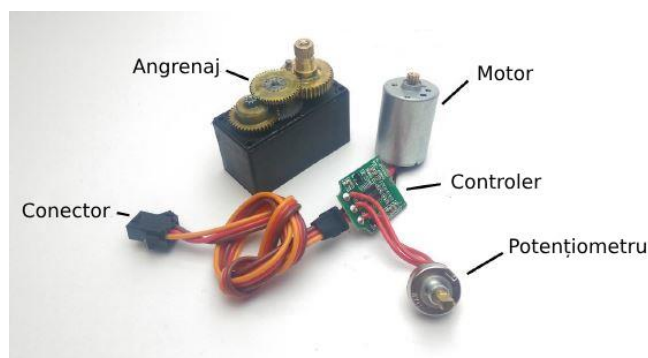


Fig. 3.1.3.1 Servomotor de curent continuu [5]

Pentru operarea acestui motor se utilizează 3 fire. Cel galben este semnal PWM de control. În funcție de factorul de umplere al PWM-ului, brațul motorului se rotește până la un unghi dat. Celelalte 2 fire, roșu (Vcc) și maro (Ground), sunt alimentarea acestuia.

Semnalul PWM este transformat într-o tensiune în interiorul controlerului. Cu ajutorul potențiometrului, care oferă o tensiune variabilă în funcție de rotația angrenajului, are loc compararea celor două tensiuni, care apoi comandă driver-ul de

motor care transferă comanda elementului de execuție, în cazul nostru, motorul de curent continuu. Acest circuit este considerat a fi un proces în buclă închisă cu constantă mică de timp.

Angrenajul construit cu conectarea mai multor roți dințate are rolul de a transforma turația mare a motorului care oferă un cuplu mic în rotație mică și cuplu mare.

În următoarea figură este reprezentată schema de reglare în buclă închisă a servomotorului. Figura 3.1.3.2

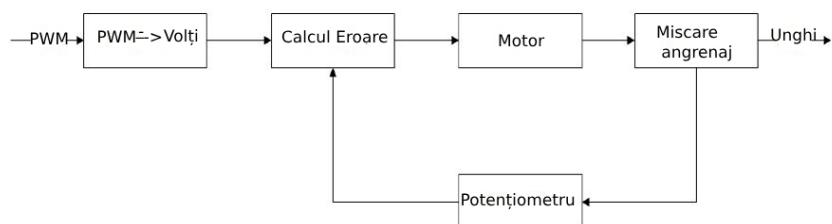


Fig. 3.1.3.2 Schema de reglare în buclă închisă

3.1.4 Microcontroler (MC)

Un microcontroler integrează în structura sa mai multe circuite integrate cu diferite funcționalități. Poate fi definit ca un sistem complet de calcul integrat pe un singur cip. Acesta include o unitate centrală de procesare, memorie, un oscilator pentru generarea semnalelor de tact și interfețe pentru dispozitivele de intrare/ieșire. Un microcontroler poate fi considerat ca fiind similar cu un microprocesor, dar pe același cip integrează și memoria și diverse interfețe. Performanțele unității centrale, capacitatea de memorie și tipurile de interfețe incluse în structura internă a microcontrolerului sunt determinate de natura și complexitatea aplicației în care este utilizat.

În figura următoare este prezentată o schemă simplificată a unui microcontroler (Fig. 3.1.4.1).

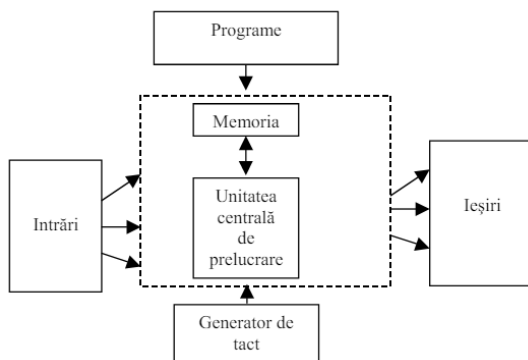


Fig. 3.1.4.1 Structură simplificată MC

Partea centrală a acestei structuri este reprezentată de către microprocesor (UCP) sau unitatea centrală de prelucrare formată și ea la rândul ei din UAL (unitate aritmetică-logică) și UC (unitate de control). Pentru a putea să fie folosit, microcontrolerul are nevoie

și de programe care sunt scrise în memorie. Acesta folosește diferite tipuri de memorii în funcție de necesități (EEPROM, ROM, Flash, etc).

Dispozitivele I/O reprezentate de intrări și ieșiri conduc operații generale de comunicare atât transfer paralel și serial de date. Aceste dispozitive sunt văzute de unitatea centrală ca porturi (analogice și digitale).

Generatorul de tact cu care este echipat microcontrolerul generează semnale impulsuri provenite de la un cristal de cuarț care asigură funcționarea mediului intern. Viteza de oscilație a semnalului de clock (tact) este asimilată cu frecvența la care microcontrolerul poate să lucreze, numită și viteza procesorului.

Pentru realizarea acestui proiect s-a utilizat un microcontroler Arduino Nano. Controlerul de tip Arduino este ușor de programat dar cel mai important lucru este acela că este de tip open-source în care pentru orice problemă sau eroare se poate găsi o soluție pe forum-ul acestora. Este construit cu un microprocesor pe 8 bit Atmel AVR sau 32-bit Atmel AVR care poate să fie ușor de scris cu limbajul de programare C sau C++.

Avantajele folosirii acestui tip de microprocesor sunt diverse în funcție de necesități. Comunitatea activă de utilizatori care postează regulat experimente sau rezolvă problemele celorlalți utilizatori este un atu foarte important.

Fiind o platformă open-source, partea de software pentru aplicații nu este cumpărată, găsindu-se liberă iar singurul cost apare în momentul achizițiilor de componente hardware, ceea ce îl face accesibil pentru proiecte de dezvoltare extrascolare cât și pentru studenți.

Capacitatea platformei Arduino de a rula pe diferitele sisteme de operare de la Linux, macOS, Microsoft este un alt avantaj al acestui tip de microprocesor.

3.1.5 Filtre RLC

Filtrele RLC sunt circuite electrice complexe folosite pentru a procesa semnale. Sunt formate din 3 componente pasive: rezistența, condensatorul și bobina electrică sau inductorul. În interiorul circuitului pot avea mai multe funcții, de la înmagazinarea energiei electrice sub formă de câmp magnetic sau electric, până la conducerea și atenuarea semnalelor. Aceste circuite sunt considerate a fi elemente liniare deoarece rezistența se exprimă cu teoria lui Ohm în circuit iar relația între condensator, inductor și curentul urmărește o tendință liniară. De aceea, în funcție de configurarea componentelor filtrelor RLC în modul paralel, serial și combinație între acestea, se identifică valorile numerice ale acestor componente electrice [10].

În timpul încărcării unui condensator, energia se acumulează în acesta pe măsură ce tensiunea crește. În timpul descărcării, energia este eliberată din condensator în circuit. Într-o bobină, energia este stocată sub formă de câmp magnetic pe măsură ce curentul trece prin aceasta, iar apoi este eliberată în circuit când curentul scade. Rezistorul

transformă energia electrică în căldură atunci când curentul trece prin el. Aceste procese sunt fundamentale în funcționarea circuitelor electrice.

Filtru trece jos

De cele mai multe ori la achiziția semnalelor de la senzori se constată zgomot de măsurare fiind necesară filtrarea datelor provenite de la senzori. Pentru a remedia această problemă, în general se utilizează un filtru trece-jos, destinat eliminării erorilor de măsură ce pot apărea la frecvențe înalte.

O subcategorie a filtrelor RLC este reprezentată de filtrul trece jos format din doar 2 componente pasive: rezistență și condensator. Acesta permite trecerea doar a semnalelor cu frecvențe joase și atenuează alte semnale peste frecvența de tăiere a circuitului. Un exemplu este redat în Figura 3.1.5.1, unde: U_{in} - tensiunea de intrare, U_{out} - tensiunea de ieșire a circuitului, R - rezistența și C - condensator.

Componenta pasivă este un element care nu necesită o sursă de alimentare DC suplimentară pentru a funcționa. Un filtru format dintr-un rezistor și un condensator nu poate amplifica semnalele AC de intrare, deoarece nu conține tranzistoare sau amplificatoare operaționale care necesită alimentare DC. Întreaga energie necesară acestui circuit provine de la componenta semnalului AC, în timp ce sursa de alimentare DC furnizează curentul necesar amplificatorului. Astfel, semnalele AC pot trece prin acest filtru fără probleme, dar nu vor fi amplificate.

Pentru a putea descrie relația dintre intrarea circuitului RC și ieșirea acestuia, un mod simplu este prin folosirea funcției de transfer a circuitului respectiv. Funcția de transfer este un instrument matematic reprezentat ca raportul dintre tensiunea de ieșire și tensiunea de intrare. Deoarece intrarea sistemului este de aceeași natură cu ieșirea aceluiasi sistem, putem spune că se află în buclă directă.

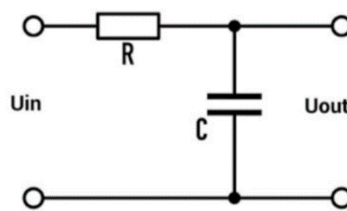


Fig. 3.1.5.1 Filtru trece jos

Pentru determinarea funcției de transfer (FDT) a circuitului respectiv se calculează:

$$u(t) = R \cdot I + x_1 \quad (7)$$

unde:

- $u(t)$ este tensiunea de intrare în funcție de timp.
- $R \cdot I$ reprezintă căderea de tensiune pe rezistența R .
- x_1 este căderea de tensiune pe condensatorul C .

Deoarece curentul prin rezistența R este egal cu curentul prin condensator rezultă :

$$I = C \cdot \dot{x}_1 \quad (8)$$

unde:

C – reprezintă capacitatea condensatorului;

\dot{x}_1 - reprezintă derivata tensiunii condensatorului în raport cu timpul.

Ieșirea sistemului fiind chiar căderea de tensiune pe condensator rezultă:

$$y = x_1 \quad (9)$$

Din ecuațiile (7) și (8) rezultă

$$\dot{x}_1 = \frac{u}{R \cdot C} - \frac{x_1}{R \cdot C} \quad (10)$$

În spațiul stărilor au rezultat coeficienții următoarelor matrici din ecuațiile (9), (10):

$$A = -\frac{1}{R \cdot C} \quad ; \quad B = \frac{u}{R \cdot C} \quad ; \quad C = 1; D = 0; \quad (11)$$

Forma funcției de transfer rezultată din ecuația (11) :

$$F(s) = \frac{\frac{1}{R \cdot C}}{s + \frac{1}{R \cdot C}} \quad (12)$$

3.2 Analiza mecanică

Analiza mecanică a proiectului a fost făcută doar pentru o singură legătură între servomotor și suportul plăcii deoarece pentru cealaltă parte este absolut aceeași analiză.

În figura 3.2.1 se prezintă schema structurală a unui lanț cinematic care evidențiază simplificat numărul, natura elementelor componente și modul în care acestea se leagă între ele. Pe baza schemei s-a realizat o analiză mecanică a structurii.

Punctul O este reprezentat printr-un cuplaj cardanic. Acesta transformă mișcarea de rotație uniformă a arborelui conducător în mișcare de rotație a arborelui condus [11]. E, D, C reprezintă cuple cinematice de rotație. Cu $L_1, L_2, L_3, L_4, l_p, l_A$ au fost notate lungimile elementelor, iar cu 1, 2, 3 și 4 s-au notat elementele cinematice mobile ale figurii. Cu literele A și B a fost notat punctul central de contact al cuplei cardanice, respectiv punctul central de contact al elementului cinematic 2.

Literele h și b indică distanța dintre cuplele E și O pe înălțime, respectiv distanța cuplelor E și O pe lățime. Pentru α, φ, θ au fost notate unghiurile pe care le fac cuplele cu normala la suprafață.

Cuplele O și E sunt cuple de clasa a 5-a deoarece permit o singură mișcare, cea de rotație. Pentru C se consideră cupla de clasa a 4-a prin permiterea a 2 mișcări (de rotație și translație), iar pentru D luăm în considerare 3 grade de libertate (1 de rotație și 2 de translație), fiind cupla de clasa a 3-a. Rezultatul este dat după formula:

$$K = 6 - f \quad (13)$$

unde K reprezintă clasa cuplei respective, 6 este considerat numărul maxim de mișcări pe care le poate avea (grade de libertate), iar f este numărul de mișcări blocate. În cazul nostru, coeficientul f are valoare 5 pentru toate cuplurile deoarece acestea permit doar o singură mișcare de rotație pe un plan.

După forma geometrică a zonelor de contact, acestea sunt cuple cinematice superioare deoarece zona de contact nu este o suprafață ci o curbă. Presiunile sunt mult mai mari în comparație cu cele inferioare.

Mișcarea elementelor se realizează în plane paralele, fiind considerate cuple cinematice plane deoarece mișcarea elementelor se desfășoară în același plan.

După caracterul legăturilor dintre elemente, identificăm că toate cuplurile sunt cuple cinematice geometric închise deoarece două elemente oarecare în contact nu se pot desface fără demontarea unuia dintre aceste elemente.

Lanțul cinematic format din legătura tuturor elementelor este unul de tipul plan deschis simplu.

Gradul de libertate al lanțului cinematic este considerat a fi numărul mișcărilor simple ce pot fi efectuate de toate elementele. Notăția acestuia se face cu litera L . În calcul se ține seama de gradul maxim de libertate al unui element, care este redus în momentul în care se leagă alt element printr-o cuplă cinematică.

$$L = 6n - \sum_{i=1}^5 i \cdot c_i \quad (14)$$

- n reprezintă numărul elementelor cinematice

- c_i reprezintă numărul de cuple cu clasa i

Prin înlocuirea din formula de mai sus rezultă gradul de libertate L al lanțului cinematic egal cu 7. Cu formula următoare definim și gradul de mobilitate (M):

$$M = L - 6, \quad (15)$$

prin care se stabilește numărul de parametri necesari pentru a defini pozițiile elementelor în raport cu un element fix. Din calcule rezultă gradul de mobilitate al lanțului cinematic egal cu 1.

Deoarece gradul de mobilitate este egal cu numărul de elemente motoare care antrenează lanțul cinematic, se poate clasifica ca fiind un mecanism desmodrom care asigură o mișcare univoc determinată a oricărui element condus. [8]

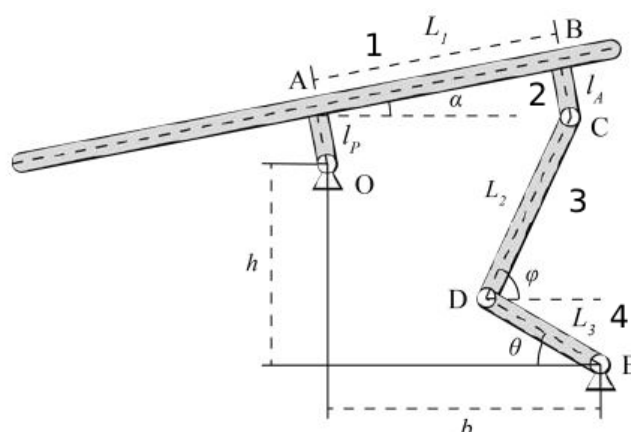


Figura 3.2.1 Schema structurală a unui lanț cinematic [12]

3.3 Proiectarea standului experimental de tip bilă-masă

Primul pas în realizarea proiectului de licență a fost prin realizarea modelului standului experimental pentru testarea reguletoarelor. Acesta constă în 3 picioare de sprijin modificate pentru a susține placa de bază pe care se află toate elementele și pentru fixarea celor 2 servomotoare care controlează direcțiile pe OY și pe OX.

Conexiunea între stâlpul de susținere al proiectului și suportul pe care va sta placa rezistivă se face cu ajutorul unei cuple cardanice. Această cuplă permite deplasarea bilei pe cele 3 planuri XYZ (se efectuează doar mișcări de translație pe aceste planuri fără cele de rotație). În interiorul picioarelor care mențin fixă placa de bază pe care se află toate elementele se găsesc cele 2 servomotoare. Conexiunea dintre motoare și suportul plăcii rezistive se realizează cu 2 tije care au la fiecare capăt câte un cap rotativ pentru favorizarea mai ușoară a mișcării plăcii rezistive.

Structura din Figura 3.3.1 este un model orientativ pe care l-am folosit pentru crearea propriului stand. A fost nevoie de multe modificări pentru satisfacerea nevoilor în funcție de înălțime, rapoarte de dimensiuni, materie primă folosită și structura pe ansamblu.

Fiecare piesă a fost reintrodusă în aplicație și toate dimensiunile modificate și chiar schimbat design-ul și modelele pieselor.

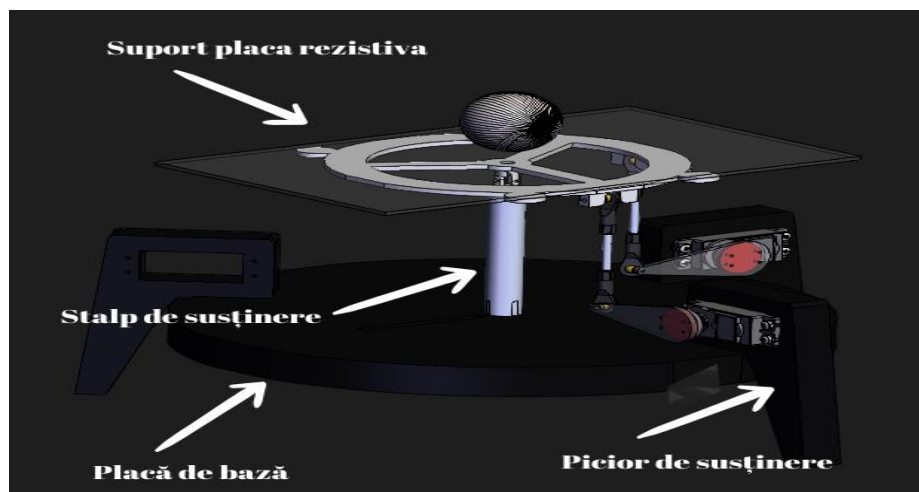


Figura 3.3.1 Model orientativ [13]

Pentru schimbarea elementelor s-a folosit software-ul de proiectare mecanică Fusion 360 care este și o aplicație pentru CAD, CAM ,etc.

Pentru a proiecta o piesă, prima dată trebuia să cunoaștem specificațiile acesteia. În primul rând, dimensiunile, rapoartele, găuri și alte decupări dacă este cazul. Pentru toate componentele s-a folosit ca material pentru printare PETG. Următorul pas este crearea unui design. Se creează un sketch, care înseamnă o schiță 2D a bazei piesei care urmează să fie proiectată. Se folosesc diferitele instrumente pentru a desena după specificațiile impuse conturul piesei după un planul selectat.

Un exemplu sugestiv este prezentat in figura următoare (Figura 3.3.2) care reprezintă baza gardului pus in jurul suportului plăcii rezistive.

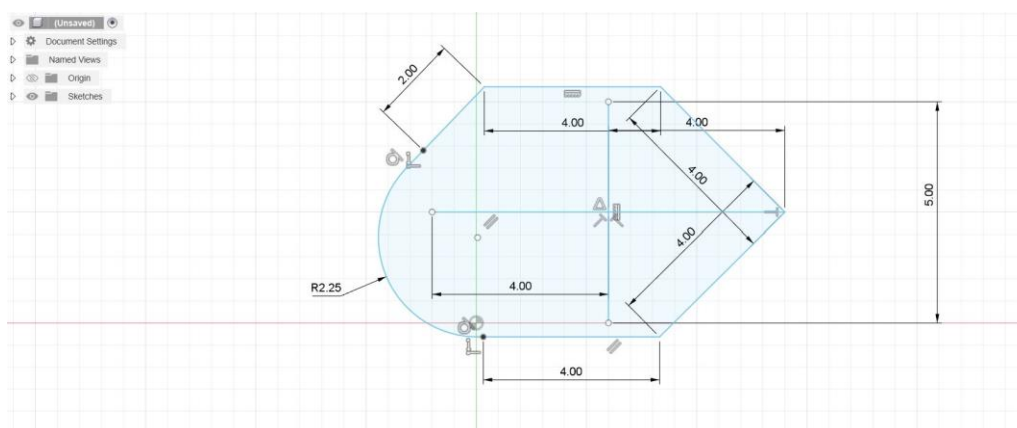


Figura 3.3.2 Schiță element

După schițarea formei se creează formele 3D prin extrudare. Extrudarea este procesul care implică transformarea unei forme bidimensionale sau a unei schițe într-un obiect tridimensional prin extinderea sau extrudarea sa într-o anumită direcție. Este un instrument esențial în modelarea 3D și este adesea combinat cu alte tehnici și instrumente pentru a crea modele complexe și detaliate. Un model este prezentat în Figura 3.3.3.

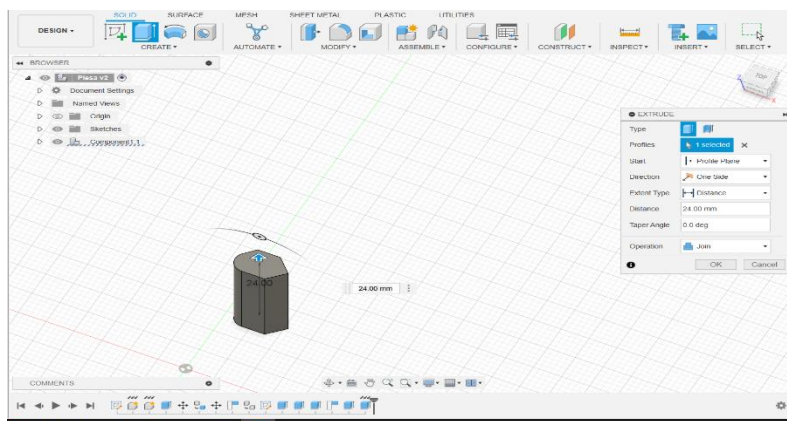


Figura 3.3.3. Extrudare

În următorii pași sunt reprezentați prin adăugarea de noi componente, lipirea părților create și formarea obiectelor. Mai au loc și procese de ajustare a dimensiunilor. Figura 3.3.4

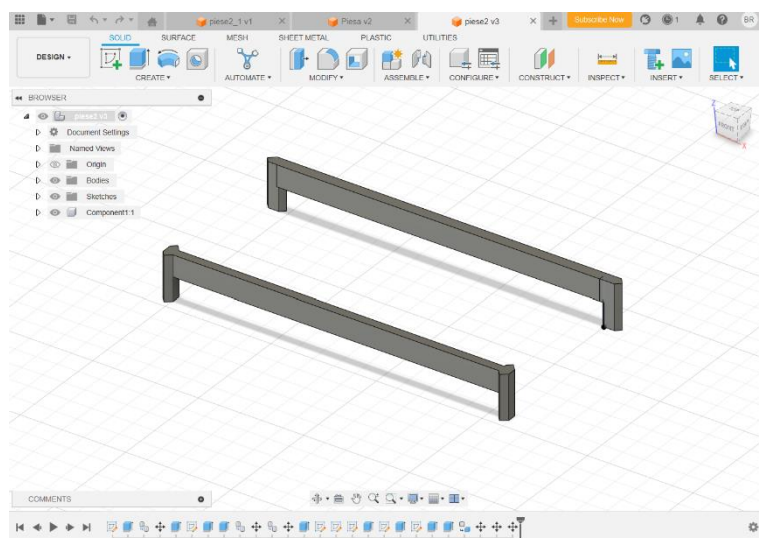


Figura 3.3.4 Formarea pieselor

Următorul pas în procesul de proiectare și fabricare implică utilizarea unui software dedicat pentru a converti fișierul .stl creat în Fusion 360 într-un cod G-code. Acest cod este esențial pentru procesul de imprimare 3D și trebuie să fie compatibil cu imprimanta utilizată.

Pentru piesele proiectate în Fusion 360, vom utiliza Creality Slicer, un software specializat conceput pentru imprimanta 3D Creality Sermoon V1. Acest program va importa fișierul .stl și va genera un cod G-code conținând instrucțiunile necesare pentru imprimanta 3D.

După importarea fișierului .stl în Creality Slicer, se vor ajusta setările de imprimare, cum ar fi viteza, densitatea infilării și temperaturile de extrudare, pentru a obține

rezultatele dorite. Apoi, Creality Slicer va produce fișierul G-code care va conține toate instrucțiunile necesare pentru imprimanta 3D.

Acest fișier nou creat poate fi transferat pe imprimanta 3D prin intermediul unui card SD sau al unui cablu USB. După transfer, imprimanta 3D va citi și executa instrucțiunile din fișierul G-code pentru a produce obiectul 3D folosind materialele și parametrii specificați ca în Figura 3.3.5

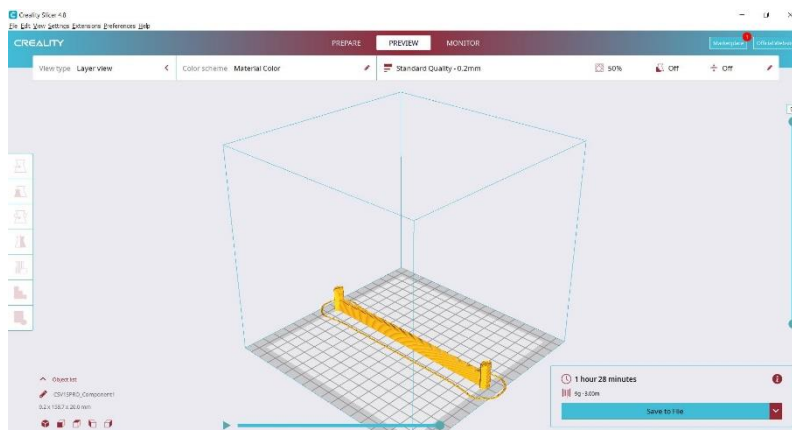


Figura 3.3.5. Pregătire element de printare

Ultimul pas în proiectare este scoaterea pieselor propriu-zise la imprimanta 3D. Timpul de prelucrare al unei piese diferă în funcție de mărime și de cât material este utilizat. Durata este estimată de la o oră și jumătate și poate ajunge până la 12 ore sau chiar mai mult.



Figura 3.3.6. Printare placă de bază

În Figura 3.3.6 este un exemplu din timpul printării al plăcii de bază al standului experimental.

3.4 Analiza software

Proiectul Bilă-Masă implică controlul poziției unei bile pe o placă folosind un traductor de presiune și un sistem de reglare bazat pe Arduino. Sistemul detectează poziția bilei pe axele X și Y și ajustează înclinarea plăcii pentru a menține sau a modifica poziția bilei conform unor referințe dorite.

La aplicarea presiunii pe placă, se citesc pozițiile analogice pe axele X și Y utilizând un traductor de presiune care generează semnale analogice proporționale cu poziția bilei pe cele două axe. Se citesc referințele sistemului pentru cele două axe, stabilind țintele de poziție dorite.

Organigrama codului implementat pe microcontroler se află expusă în figura de mai jos. Figura 3.4

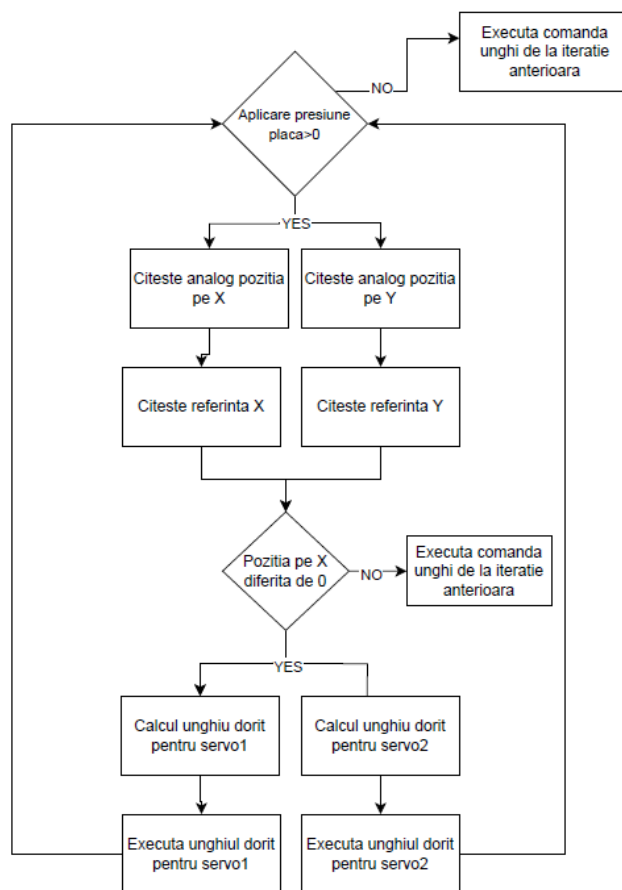


Fig. 3.4 Organigrama arhitecturii software

Datorită prezenței zgomotelor de măsurare este necesară utilizarea unui filtru software. După filtrare se poate determina poziția curentă a bilei și acționa în funcție de poziția de referință impusă. Dacă poziția pe axa X este zero (indicând o eroare de la traductor), se execută comanda de control de la iterația anterioară. Dacă poziția pe axa X este diferită de zero, se continuă cu calculul necesar pentru controlul poziției. Astfel se va

determina unghiul dorit pentru a ajusta înclinarea plăcii care asigură deplasarea bilei la poziția dorită, utilizând un algoritm de control implementat cu ajutorul unei librării Arduino. Algoritmul de control folosește un regulator pentru a calcula unghiul necesar astfel încât bila să ajungă la poziția dorită. Acest ciclu de citire a poziției, filtrare, calcul al unghiului și execuție se repetă atâta timp cât presiunea este aplicată asupra plăcii rezistive, presiune însemnând mișcarea sau staționarea bilei deasupra traductorului.

3.4.1 Comanda servomotor

Pentru controlul servomotoarelor este necesară biblioteca Servo.h. Pinii de control sunt definiți astfel: `int servoPin1 = 3` pentru primul servomotor și `int servoPin2 = 2` pentru al doilea servomotor. Se creează obiectele `Servo Servo1` și `Servo Servo2` pentru a controla cele două servomotoare.

În funcția `setup()`, comunicarea serială este inițializată la o rată de 115200 bauds pentru debug și monitorizare. Primul servomotor este atașat la pinul 3, iar al doilea la pinul 2 folosind funcțiile `Servo1.attach(servoPin1)` și `Servo2.attach(servoPin2)`.

În bucla principală `loop()`, unghiul pentru primul servomotor este setat la valoarea `180 - round(Outputx)`, inversând astfel direcția de control. Unghiul pentru al doilea servomotor este setat la valoarea rotunjită `round(Outputy)`.

Ca și parametri, `Outputx` este valoarea de comandă pentru primul servomotor (axa X) și trebuie să fie între 0 și 180. Aceasta valoare este rotunjită și inversată în cod. `Outputy` este valoarea de comandă pentru al doilea servomotor (axa Y) și trebuie să fie între 0 și 180. Aceasta valoare este rotunjită în cod.

3.4.2 Citire poziție bilă utilizând placa rezistivă

Pentru citirea poziției bilei se utilizează biblioteca `TouchScreen.h` care asigură citirea poziției bilei de pe o placă rezistivă. Definițiile pinilor analogici și digitali (YP, XM, YM, XP) sunt utilizate pentru a inițializa obiectul `TouchScreen`, facilitând interacțiunea cu plăcile rezistive pentru detectarea coordonatelor tactice. Prin apelul funcției `getPoint()`, se obțin coordonatele X și Y ale punctului atins, împreună cu nivelul de presiune detectat (z), furnizate sub forma unui obiect de tip `TSPoint`.

Pentru a asigura o corectă funcționare a sistemului de control bazat pe placă rezistivă, este esențială calibrarea adecvată a limitelor fizice (`Xmin`, `Xmax`, `Ymin`, `Ymax`) ale plăcii. `Xmin` și `Xmax` reprezintă limitele minime și maxime ale coordonatei X pe placă rezistivă. Aceste valori determină intervalul fizic pe care placă îl poate detecta pe axa X, iar pentru axa Y sunt reprezentate de `Ymin` și `Ymax`.

`Xmm` și `Ymm` indică dimensiunile reale în milimetri (mm) ale suprafeței plăcii rezistive pe axele X și Y. Aceste dimensiuni sunt esențiale pentru scalarea și conversia corectă a coordonatelor detectate în unități de măsură fizice relevante care se realizează cu ajutorul variabilelor `Xconversion` și `Yconversion`.

3.4.3 Sistem de control pozitie bila

În proiectarea sistemelor de control, s-a optat pentru utilizarea a două metode distincte.

Prima metodă implică abordarea experimentală, în care se dezvoltă regulatorul PID cu sprijinul librărilor Arduino. Acest proces include o etapă de testare a diferiților parametri ai regulatorului pentru a optimiza performanța sistemului.

Regulatele PID sunt printre cele mai utilizate tipuri de controlere în domeniul automatizării. Ele sunt populare datorită versatilității lor și a capacității de a fi implementate într-o gamă largă de sisteme. Unul dintre motivele principale pentru popularitatea lor este eficacitatea în îmbunătățirea performanței sistemelor controlate.

Aceste regulate pot fi utilizate pentru a asigura stabilitatea sistemelor, pentru a reduce erorile și pentru a îmbunătăți răspunsul acestora la intrările sau perturbațiile externe. Formula generală este data:

$$u(t) = K_p \cdot e + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{d \cdot e(t)}{dt} \quad (16)$$

În formula de mai sus $u(t)$ reprezintă intrare sistemului iar litera e semnifică abaterea sau eroare. Abrevierea PID provine de la cei 3 parametri ai regulatorului care influențează performanțele sistemelor : proportional (K_p), integrator (K_i) și derivativ (K_d). Sunt folosite în structuri de automatizare în buclă închisă sau controlere de feedback.

Coeficientul proportional

În cazul coeficientului proporțional, controlul este simplu. Un regulator pur proporțional produce o comandă proporțională cu eroarea sistemului. Pentru un coeficient cât mai mare, regulatorul tinde să elimine din ce în ce mai mult eroarea statică la poziție, dar în același timp, un P ridicat poate face sistemul insensibil la perturbații, ceea ce poate duce la instabilitate. De aceea, este necesar un compromis în ceea ce privește alegerea coeficientului pentru un regulator P .

Coeficientul integrator

Funcția principală a integratorului este ca variabila procesului să ajungă la referința impusă sau la punctul staționar. Cu un regulator P (proporțional) implementat, de multe ori sistemul nu ajunge la eroare staționară la poziție egală cu 0. Datorită efectului integrator, o eroare mică la poziția procesului conduce la o creștere a semnalului de control, astfel eliminând efectul de eroare.

Ca și proprietăți ale efectului integrator, observăm un fenomen de eliminare a erorii staționare la poziție pentru valori finite ale coeficientului. În momentul în care coeficientul T_i tinde la infinit, rezultă un regulator pur integrator, ceea ce poate duce la creșterea erorii de poziție a sistemului sau chiar la instabilitatea acestuia [7].

Coeficientul derivativ

Principalul avantaj al coeficientului derivativ îl constituie capacitatea de a îmbunătăți stabilitatea în bucla închisă a sistemului. În momentul în care apar perturbații,

este necesar un timp pentru ca variabilele de control să aibă efect asupra ieșirii procesului, ceea ce arată o întârziere în corectarea erorilor. Efectul D (derivativ) al regulatorului oferă o predicție a erorii în viitor prin utilizarea tangentei la curba erorii procesului.

Prin ajustări iterative, se caută configurarea ideală a coeficienților PID (Proportional-Integral-Derivative). Parametrii determinați experimental sunt:

- Pentru axa Ox: $K_p=0.05$ și $T_d=0.0055$
- Pentru axa Oy: $K_p=0.045$ și $T_d=0.0045$

Cea de-a **doua metodă** adoptă o abordare analitică, bazată pe modelul matematic al procesului reprezentat de o funcție/matrice de transfer a procesului și constă în proiectarea unui regulator cu avans de fază.

Proiectarea unui regulator cu avans de fază utilizând diagramele Bode implică mai mulți pași esențiali. Mai întâi, se obține funcția de transfer a sistemului deschis, care descrie matematic comportamentul sistemului. Apoi, se trasează diagramele Bode, care includ diagrama de amplitudine și diagrama de fază, pentru a vizualiza răspunsul sistemului la diferite frecvențe.

Următorul pas este stabilirea specificațiilor de performanță, cum ar fi marginile de fază și de câștig dorite, precum și frecvența de tăiere. În funcție de aceste specificații, se alege o frecvență de operare la care se va aplica corecția de fază. De obicei, această frecvență se alege în regiunea unde sistemul are nevoie de îmbunătățiri în fază.

Pentru a îmbunătăți stabilitatea și performanța, se determină cât de mult avans de fază este necesar. Acest avans de fază dorit ar trebui să fie cuprins între 30° și 60° . Regulatorul cu avans de fază este proiectat astfel încât să introducă acest avans de fază la frecvența selectată. Aceasta implică adăugarea unui element de avans de fază la sistem, care modifică funcția de transfer astfel încât să se obțină un răspuns îmbunătățit.

Elementul de avans de fază este configurat pentru a crește faza sistemului la frecvența de operare aleasă, fără a afecta negativ alte aspecte ale performanței. După proiectarea regulatorului, se ajustează parametrii acestuia pentru a îndeplini specificațiile de câștig și fază.

În final, sistemul cu regulatorul proiectat este simulat pentru a verifica dacă îndeplinește specificațiile dorite. Dacă este necesar, se fac ajustări suplimentare. După ce simulările confirmă că sistemul funcționează conform așteptărilor, regulatorul este implementat în sistemul fizic și testat pentru a asigura că funcționează corect în condiții reale.

4 Implementare și Testare

4.1 Realizarea standului experimental de tip bilă-masă

Dupa printarea 3D a pieselor, se realizeaza asamblarea acestora prin imbinare, lipire si prinderea componentelor cu holsuruburi. Scheletul standului experimental poate sa fie vizualizat in figura urmatoare, Figura 4.1.1

- Etape de realizare si montare a standului

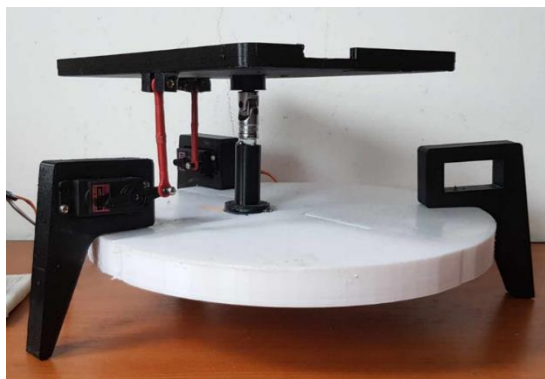


Figura 4.1.1 Scheletul standului experimental

In figura de mai jos, Figura 4.1.2 este prezentat circuitul electric realizat cu ajutorul aplicației Fritzing beta, in care se poate și testa funcționalitatea pieselor conectate la un loc.

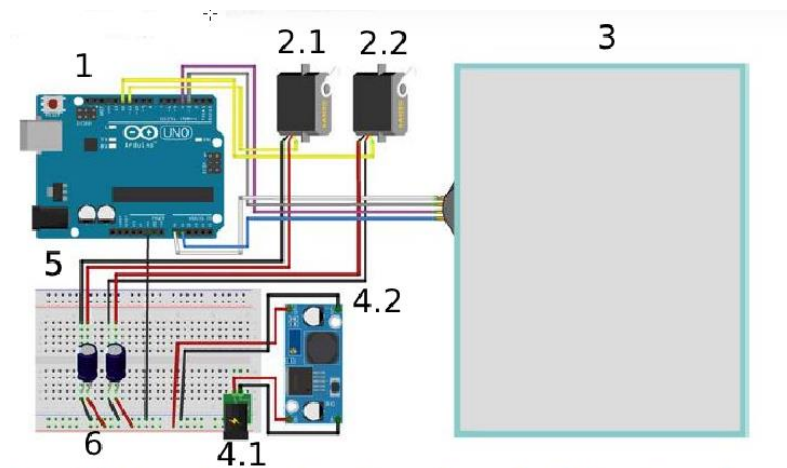


Figura 4.1.2 Circuitul electric

Elementele circuitului sunt numerotate de la 1 pana la 6 însumând:

- 1- Placa de dezvoltare compatibila Arduino Nano v3
- 2- Pentru 2.1 si 2.2 sunt 2 servo-motoare de tipul MG996R
- 3- DMC AST-084A080A 8.4inch, placa rezistivă cu 4 fire 177 x 136mm
- 4- 4.1-alimentare 9V, 4.2-sursa de alimentare de 3.3-5v

- 5- Breadboard 400 puncte
- 6- 2 condensatori 1nF pentru filtrare

Diagrama prezintă un sistem electronic complex controlat de un microcontroler Arduino Nano. Acesta funcționează ca nucleu central al sistemului, gestionând și coordonând multiple componente interconectate pentru funcționalitate integrată.

Servomotoarele (Elementele 2.1 și 2.2) sunt utilizate pentru controlul precis al poziției mecanismelor sau dispozitivelor în sistem. Acestea sunt conectate la pinii digitali 2 și 3 ai Arduino Nano pentru a primi semnalele de control, iar alimentarea lor provine de la o sursă de tensiune externă (Elementul 4.2). Condensatorii de filtrare (Elementul 6), montați în paralel cu alimentarea servomotoarelor, sunt esențiali pentru reducerea zgomotului și stabilizarea tensiunii, asigurând funcționarea corectă a acestora.

Ecranul tactil (Elementul 3) servește drept interfață principală de interacțiune cu utilizatorul. Acesta se conectează la pinii analogici și digitali ai Arduino Nano, cu pinii specifici pentru citirea poziției pe axele X și Y (YP și XM, corespunzător A2 și A3 pe Arduino Nano), precum și pentru controlul funcțiilor digitale ale ecranului tactil (YM pe pinul 8 și XP pe pinul 9).

Această configurare complexă permite utilizatorului să interacționeze eficient cu sistemul prin intermediul ecranului tactil, în timp ce Arduino Nano asigură coordonarea și controlul precis al servomotoarelor în funcție de input-ul capturat. Alimentarea stabilă și filtrarea adecvată a semnalelor contribuie la o funcționare fiabilă și precisă a întregului sistem electronic.

Pentru că în unele momente poziția bilei este influențată de erori de citire transmise de la placa rezistivă către arduino a fost introdus un filtru trece jos pentru a limita acest zgomot.

Deoarece în integratul sursei de alimentare se regăsește un condensator care să limiteze frecvențele mai mici, a mai fost adăugat prin încercări alte 2 condensatoare de ordiunul nanofaraților pentru a elimina semnalele de frecvențe foarte mari ale circuitului.

În concluzie, după numeroase încercări și ajustări, figura 4.3.1 ilustrează standul experimental complet asamblat pentru proiectul "Ball and Plate", inclusiv integrarea componentelor electrice și mecanice. Această etapă marchează finalizarea procesului de construcție și concepție a dispozitivului experimental.

Rezultatele finale sunt o demonstrație a eforturilor în implementarea și optimizarea proiectului, evidențiind atât componentele mecanice care asigură mișcarea plăcii și controlul mingii, cât și partea electrică care gestionează interacțiunea și feedback-ul sistemului. Prin această integrare completă, standul experimental este gata pentru a fi utilizat în testele și evaluările ulterioare, în scopul de a valida performanța și funcționalitatea proiectului bila-masa conform specificațiilor stabilite.

Această abordare științifică și tehnică reflectă angajamentul în cercetarea și dezvoltarea tehnologică, contribuind la avansarea cunoștințelor în domeniul controlului robotic și al sistemelor mecatronice.

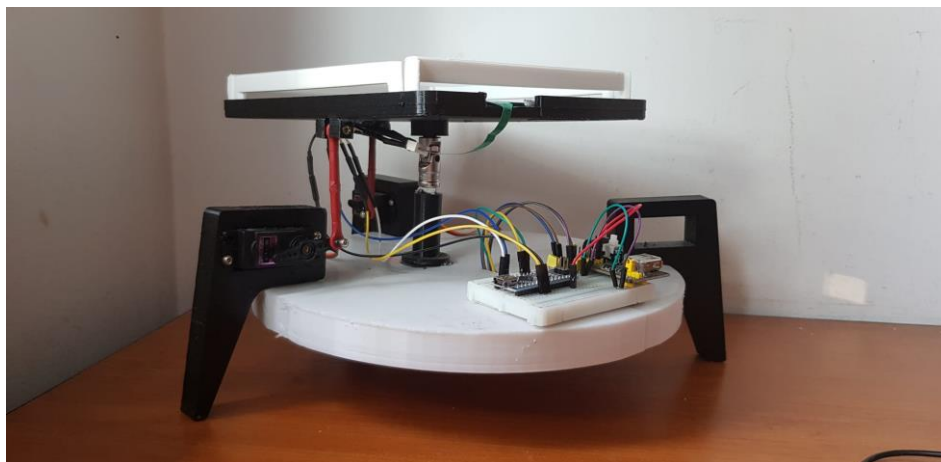


Figura 4.3.1 Standul experimental

4.2 Sistemul de determinare al poziției bilei

4.2.1 Implementare

Măsurarea coordonatelor pe un ecran tactil rezistiv se bazează pe citirea tensiunii generate la punctul de contact. Aceasta se realizează prin aplicarea unui potențial fix pe un set de pini și măsurarea tensiunii pe celălalt set de pini.

Pentru măsurarea coordonatei X, pinii YP (Y-pozitiv) și YM (Y-negativ) sunt conectați la un potențial electric fix, creând un gradient de tensiune pe axa Y. Tensiunea este măsurată între pinii XP (X-pozitiv) și XM (X-negativ). La punctul de contact (atingere), rezistența variabilă între straturile conductive modifică tensiunea măsurată. Tensiunea măsurată este proporțională cu poziția pe axa X; dacă atingerea este mai aproape de XP, tensiunea va fi mai mare, iar dacă este mai aproape de XM, tensiunea va fi mai mică, permițând astfel determinarea exactă a poziției pe axa X.

Pentru măsurarea coordonatei Y, pinii XP (X-pozitiv) și XM (X-negativ) sunt conectați la un potențial electric fix, creând un gradient de tensiune pe axa X. Tensiunea este măsurată între pinii YP (Y-pozitiv) și YM (Y-negativ). Similar cu măsurarea coordonatei X, atingerea schimbă rezistența între straturile conductive, afectând tensiunea măsurată. Tensiunea măsurată între YP și YM este proporțională cu poziția pe axa Y; dacă atingerea este mai aproape de YP, tensiunea va fi mai mare, iar dacă este mai aproape de YM, tensiunea va fi mai mică, permițând astfel determinarea exactă a poziției pe axa Y.

Pentru implementarea al poziției bilei, s-a folosit o bibliotecă din cadrul comunitatii Arduino. Biblioteca TouchScreen.h oferă funcționalități pentru a interacționa cu un ecran tactil rezistiv. Aceasta gestionează citirea coordonatelor de

atingere și a presiunii aplicate pe ecran. Ecranele tactile rezistive funcționează pe principiul modificării rezistenței la locul de atingere, determinând astfel coordonatele exacte ale punctului de contact. Figura 4.2.1.1

```

4  #include "TouchScreen.h"
5  #define YP A2
6  #define XM A3
7  #define YM 8
8  #define XP 9
9  TouchScreen ts = TouchScreen(XP, YP, XM, YM, 350);
10

```

Figura 4.2.1.1 Directive preprocesare

Directivele preprocesor #define sunt folosite pentru a defini constant numerele pinilor care sunt conectați la ecranul tactil. Acești pini sunt critici pentru determinarea coordonatelor de atingere pe ecranul rezistiv:

- YP (Y-pozitiv): Pinul analogic A2, care se conectează la stratul rezistiv superior (Y-axis pozitiv).
- XM (X-negativ): Pinul analogic A3, care se conectează la stratul rezistiv inferior (X-axis negativ).
- YM (Y-negativ): Pinul digital 8, care se conectează la stratul rezistiv inferior (Y-axis negativ).
- XP (X-pozitiv): Pinul digital 9, care se conectează la stratul rezistiv superior (X-axis pozitiv).

În linia 9, se creează un obiect ts de tip TouchScreen folosind constructorul clasei TouchScreen. Constructorul primește cinci argumente:

- XP, YP, XM și YM definesc pinii conectați la ecranul tactil.
- 350 reprezintă pragul de presiune necesar pentru a considera o atingere validă, exprimat în unități de rezistență. Aceasta valoare este esențială pentru filtrarea zgomotului și evitarea detectării atingerilor false cauzate de vibrații sau interferențe electromagnetice. În termeni tehnici, pragul de presiune este ajustat pentru a filtra variațiile minore de rezistență care nu reprezintă interacțiuni valide cu ecranul.

4.2.2 Testare cu rezultate

În cadrul experimentului, s-a utilizat axa OY pentru evaluarea comportamentului sistemului. Pe această axă s-a aplicat o intrare de tip SPAB (Set Point Angular Bias). Intrarea de tip SPAB implică modificarea unghiului servomotorului la intervale de timp diferite, ceea ce permite evaluarea răspunsului dinamic al sistemului.

Testarea a avut ca scop determinarea precisă a poziției bilei pe suprafața de contact în condițiile variabile date de intrările SPAB. În timpul testului, s-au înregistrat pozițiile bilei la diferite momente de timp, aceste date fiind apoi reprezentate grafic. Pe acest grafic, poziția bilei este indicată cu ajutorul unei curbe roșii, evidențiind traseul parcurs de bilă în timpul variațiilor de unghi aplicate servomotorului.

Această metodă de testare este esențială pentru a înțelege cum se comportă sistemul sub diferite condiții dinamice și pentru a calibra algoritmi utilizați în determinarea și controlul poziției bilei pe suprafața de contact. Astfel, se pot identifica și corecta eventualele erori în algoritm sau se pot optimiza parametrii de control pentru a obține un comportament stabil și predictibil al sistemului.

În Figura 4.2.2.1, parametrul u reprezintă comanda trimisă către un servomotor exprimată în grade. În cadrul simulării, s-a utilizat un semnal de tip SPAB ca intrare. Parametrul y , evidențiat în culoare roșie, reflectă poziția bilei pe o axă specifică, în acest caz axa y . Observăm că inițial bila se află într-o poziție statică, iar după aplicarea unei serii de trepte pozitive și negative, aceasta începe să se deplaseze.

Această reprezentare grafică ilustrează evoluția poziției bilei în funcție de comanda transmisă servomotorului, evidențiind procesul de răspuns și dinamică a sistemului în raport cu semnalul de intrare simulat.

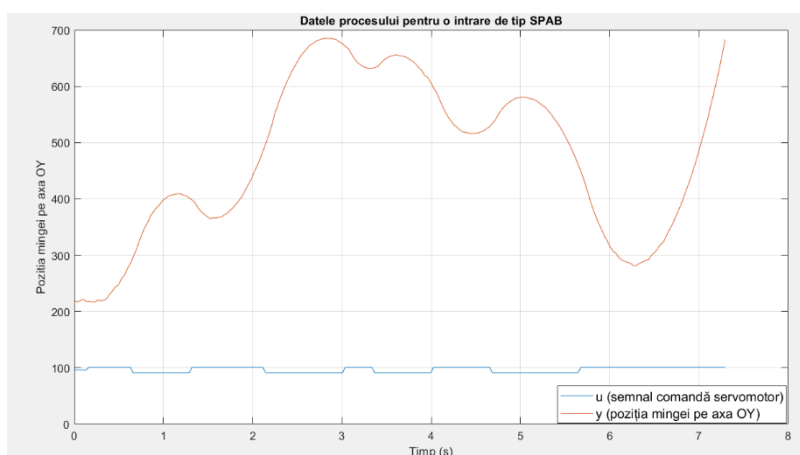


Figura 4.2.2.1 Intrare tip SPAB

4.3 Sistemul de comandă al poziției mesei

4.3.1 Implementare

Biblioteca Servo.h este inclusă în cod pentru a permite controlul precis al servomotoarelor. Două obiecte, Servo1 și Servo2, sunt create pentru a gestiona cele două servomotoare independente. Variabilele servoPin1 și servoPin2 sunt definite pentru a specifica pinii la care sunt conectate servo-motoarele.

În cadrul funcției setup(), inițializarea comunicării seriale are loc, oferind posibilitatea de monitorizare a stării sistemului prin intermediul Serial Monitor. De asemenea, servo-motoarele sunt atașate la pinii corespunzători, iar poziția inițială a acestora este setată la 90 de grade pentru a asigura o poziție de pornire cunoscută și controlată.

În bucla principală loop(), servo-motorul 2 este rotit gradual între unghiurile 90 și 180 de grade, cu o pauză de 1 secundă între fiecare mișcare. Această acțiune este realizată

pentru a demonstra funcționalitatea controlului servo-motoarelor și pentru a oferi un exemplu de utilizare a lor într-un context practic.

Mesajele sunt afișate în Serial Monitor pentru a oferi o modalitate de monitorizare a execuției codului și a stării servo-motorului în timp real. Astfel, utilizatorul poate urmări procesul de rotire a servo-motorului și poate observa cum se schimbă poziția acestuia în timpul execuției. În figura 4.3.1.1 este prezentat un exemplu de implementare a comenzilor necesare pentru actionarea celor 2 servomotoare după descrierea de mai sus.

```

1 #include <servo.h>
2
3 int servoPin1 = 3;
4 int servoPin2 = 2;
5
6 Servo Servo1;
7 Servo Servo2;
8
9 void setup() {
10   Serial.begin(115200);
11   Servo1.attach(servoPin1);
12   Servo2.attach(servoPin2);
13 }
14
15 void loop() {
16
17   int Outputx = 90;
18   int Outputy = 45;
19
20   // Control the servos
21   Servo1.write(180 - round(Outputx));
22   Servo2.write(round(Outputy));
23
24   Serial.print("Servo1 Position: ");
25   Serial.println(180 - round(Outputx));
26   Serial.print("Servo2 Position: ");
27   Serial.println(round(Outputy));
28
29   delay(1000);
30 }

```

Figura 4.3.1.1 Exemplu control servomotoare

4.3.2 Testare cu rezultate

Testarea s-a realizat prin rularea codului în mediul Arduino IDE, unde s-a constatat schimbarea poziției servomotorului în conformitate cu opțiunile din codul dat. Aceste teste validează funcționalitatea codului și a sistemului hardware, confirmând că servomotorul poate fi utilizat în aplicații practice care necesită control precis al poziției.

În figura 4.3.2.1 este prezentată testarea funcționalităților servomotoarelor 1 și 2 prin aplicarea acelorași comenzi pentru ambele motoare. Rezultatele arată că ambele motoare funcționează corect și identic, conform așteptărilor.

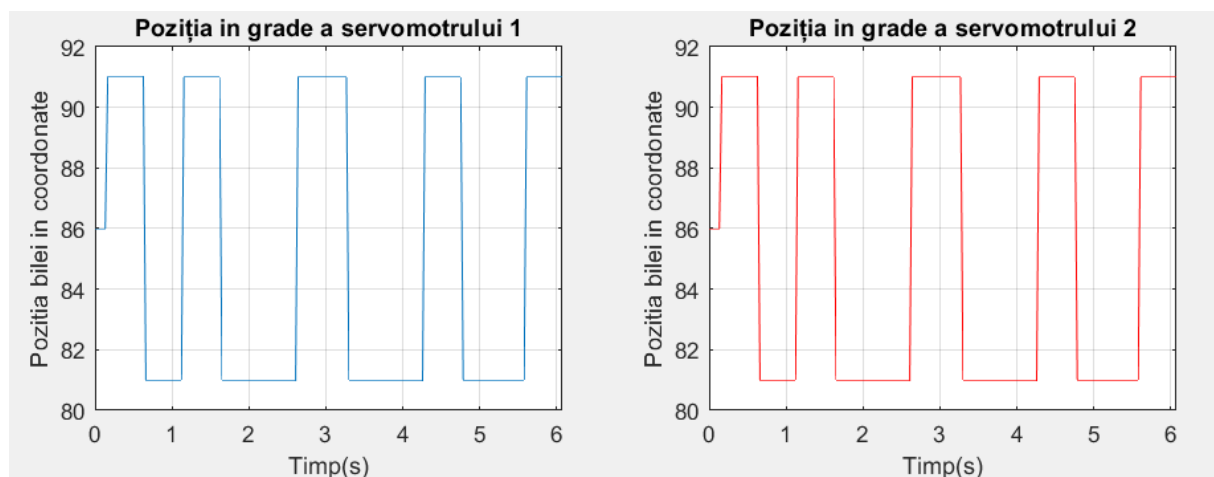


Figura 4.3.2.1 Testare implementare servomotoare

4.4 Determinarea modelului matematic

Determinarea modelului matematic al procesului se poate realiza fie prin modelare analitică pe baza legilor fizice, fie utilizând metode de identificare experimentală.

În această lucrare s-a optat pentru determinarea modelului matematic utilizând metode de identificare experimentală. Astfel într-un prim pas s-au determinat marimile de intrare – ieșire ale procesului:

- Marimi de intrare:
 - Semnalul de comandă (factor de umplere PWM) pentru servomotorul care produce înclinarea mesei pe axa Ox: C_{mx}
 - Semnalul de comandă (factor de umplere PWM) pentru servomotorul care produce înclinarea mesei pe axa Oy: C_{my}
- Marimi de ieșire:
 - Poziția bilei pe axa Ox: P_x
 - Poziția bilei pe axa Oy: P_y

După cum se poate observa sistemul are 2 intrări și 2 ieșiri fiind un sistem multivariabil MIMO (multiple-input-multiple-output).

Astfel într-un prim scenariu de identificare se consideră o modificare a semnalului de comandă C_{mx} de tip treaptă în timp ce C_{my} este menținut constant și se observă influența asupra celor două mărimi de ieșire: P_x , respectiv P_y . Figura 4.4.1

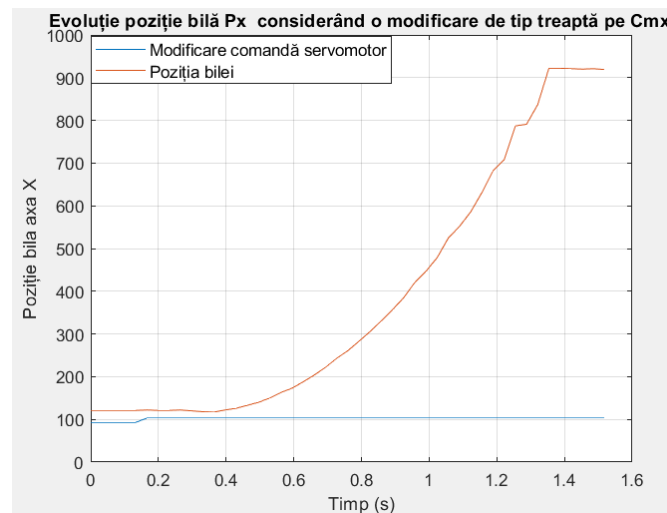


Figura 4.4.1. Evoluție poziție bilă P_x considerând o modificare de tip treaptă pe C_{mx}

În al doilea scenariu de identificare se consideră o modificare a semnalului de comandă C_{my} de tip treaptă în timp ce C_{mx} este menținut constant și se observă influența asupra celor două marimi de ieșire: P_x , respectiv P_y . Figura 4.4.2

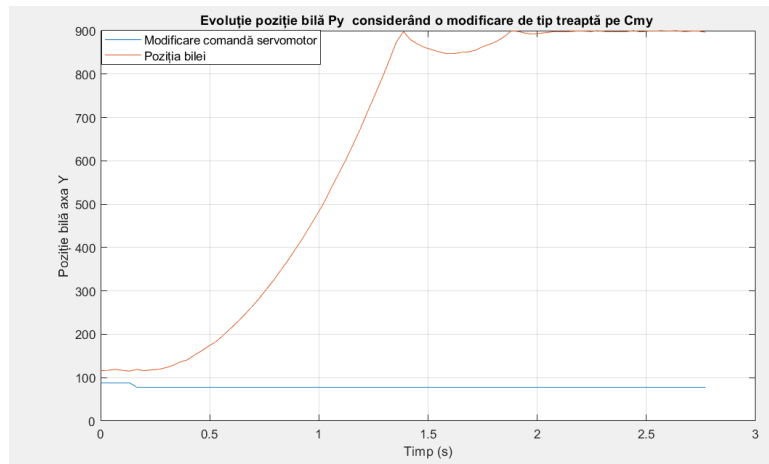


Figura 4.4.2 Evoluție poziție bilă P_y considerând o modificare de tip treaptă pe C_{my}

Utilizând datele experimentale prezentate în figurile 4.4.1 și 4.4.2 s-a determinat următorul model:

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{mx} \\ C_{my} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Modelul determinat implementat și validat la nivel de simulare utilizând mediul Matlab/Simulink după cum se poate observa în figurile 4.4.3 și 4.4.4

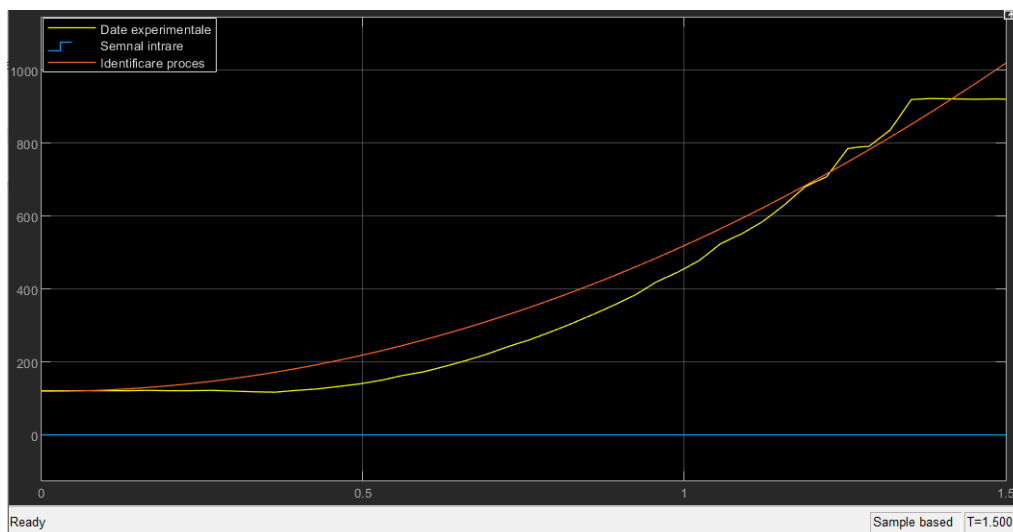


Figure 4.4.3 Evoluție poziție bilă P_x experimental vs. Simulare – considerând o modificare de tip treaptă pe C_{mx} – H_{11}

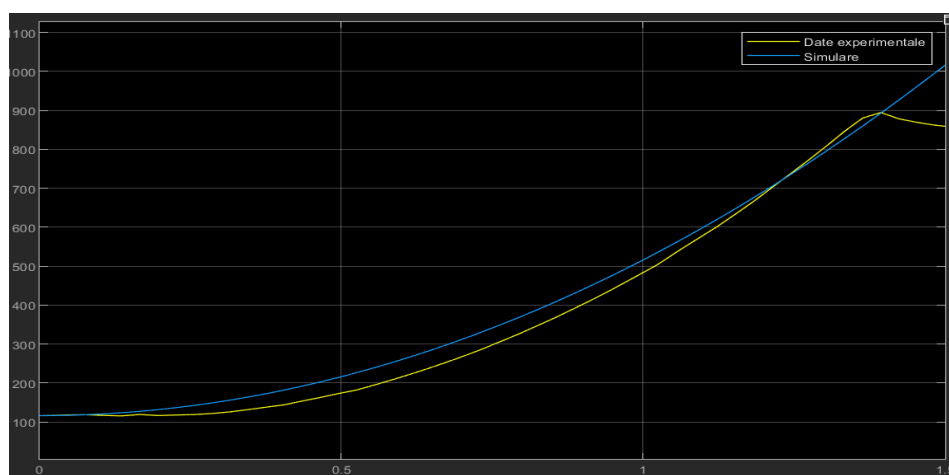


Figure 4.4.4. Evoluție pozitie bila P_y experimental vs. Simulare – considerând o modificare de tip treaptă pe C_{my} – H22

În mod similar s-au validat și celelalte funcții de transfer ale modelului matematic.

4.5 Implementarea sistemului de control

4.5.1 Regulator experimental

În cadrul acestui proiect, s-a utilizat biblioteca <PID_v1_bc.h> din Arduino pentru dezvoltarea primului regulator continuu. Obiectivul principal a fost optimizarea performanțelor sistemului experimental prin ajustarea parametrilor regulatorului PID, punând un accent deosebit pe componenta PD (proporțional-derivativ). Configurația inițială a regulatorului a inclus setarea unor valori inițiale pentru coeficienții proporțional (K_p) și derivativ (K_d), aceștia urmând să fie ajustați pe parcursul experimentelor pentru a atinge performanțe optime.

Prin multiple încercări și ajustări ale coeficienților K_p și K_d , s-a observat răspunsul sistemului în diverse condiții de operare. Aceste ajustări au fost realizate iterativ, analizându-se fiecare răspuns și modificându-se coeficienții în funcție de abaterea de la comportamentul dorit. Procesul a inclus monitorizarea parametrilor de performanță, precum timpul de răspuns, stabilitatea și amplitudinea oscilațiilor.

Rezultatele obținute au demonstrat o îmbunătățire semnificativă a performanței sistemului experimental, regulatorul PD reușind să atingă un echilibru optim între rapiditatea răspunsului și minimizarea oscilațiilor. Astfel, prin utilizarea sistematică a bibliotecii <PID_v1_bc.h> și prin ajustarea precisă a coeficienților PID, s-a realizat dezvoltarea unui regulator continuu eficient, capabil să mențină stabilitatea sistemului în diverse condiții de operare. Aceste ajustări iterative au condus la obținerea unor performanțe adecvate, conform obiectivelor experimentale propuse.

Variabilele $input_x$ și $input_y$ reprezintă poziția bilei măsurată de traductor, în timp ce $output_x$ și $output_y$ sunt comenzile generate de regulator. Variabilele $setpoint_x$ și $setpoint_y$ reprezintă poziția țintă a bilei. Coeficienții regulatorului sunt denotați prin k_p , k_i și k_d , corespunzând câștigurilor proporțional, integrator și derivativ.

```

52 PID myPIDx(&Inputx, &Outputx, &Setpointx, kpx, kix, kdx, DIRECT);
53 PID myPIDy(&Inputy, &Outputy, &Setpointy, kpy, kiy, kdy, DIRECT);
54

```

Figura 4.5.1.1. Funcția myPID din librăria Arduino

4.5.2 Regulator cu avans de fază

În etapa de proiectare a regulatorului s-au utilizat funcțiile de transfer ale procesului determinate și validate în capitolul anterior.

Odată ce modelul este clar definit, se stabilesc specificațiile de performanță dorite, precum timpul de răspuns, suprareglajul permis și marginea de fază necesară. Aceste specificații ghidează proiectarea compensatorului.

Proiectarea compensatorului de avans implică utilizarea funcției de transfer a acestuia, care poate fi exprimată ca:

$$\frac{1+aTs}{1+Ts}, \quad a > 1 \quad (18)$$

Pentru început s-a optat pentru o abordare descentralizată realizându-se proiectare a două regulatoare, unul pentru fiecare axă.

Pentru axa Y a sistemului s-a realizat diagrama Bode pentru funcția H22. Se observă o margine de fază de 0 grade, ceea ce înseamnă că sistemul este instabil. Cu această metodă se dorește creșterea marginii de fază la 50 grade. Figura 4.5.2.1

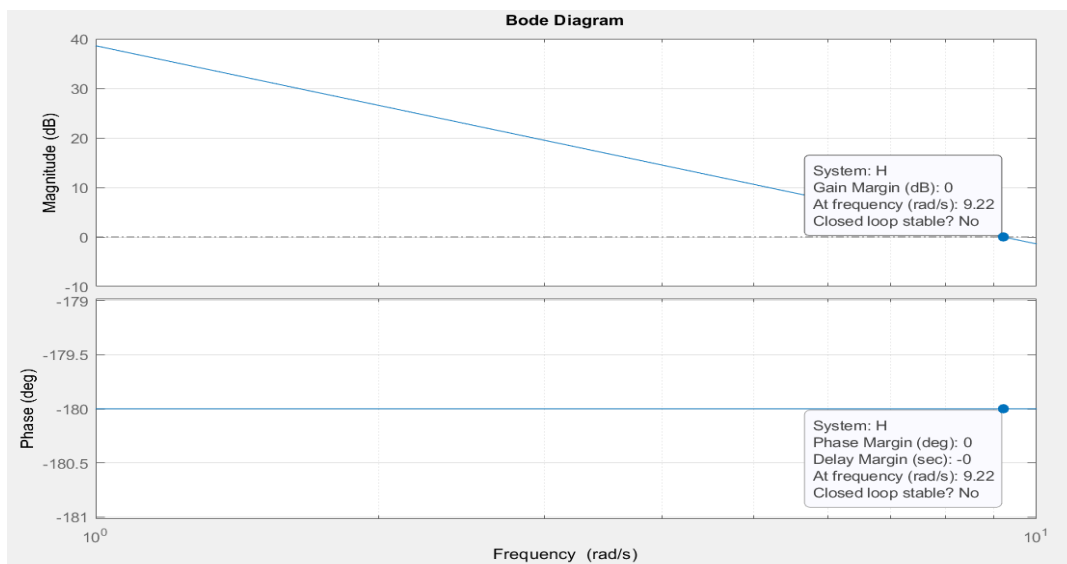


Figura 4.5.2.1 Diagrama Bode a sistemului în buclă deschisă

Următorul pas este calcularea parametrului a pentru regulator cu formula:

$$a = \frac{1+\sin(\theta)}{1-\sin(\theta)}, \quad \text{unde } \theta \text{ este marginea de fază impusă} \quad (19)$$

Se selectează frecvența la care se va introduce marginea de fază de 50 de grade cu formula:

$$\omega_m = 10 \lg(10) \quad (20)$$

Se calculează T (constanta de timp a regulatorului) după :

$$T = \frac{1}{\omega_m \cdot \sqrt{a}} \quad (21)$$

Forma finală a regulatorului din ecuațiile (16), (17), (18), (19) este:

$$H_{ry} = 0.1 \cdot \frac{0.1879s+1}{0.04397s+1} \quad (22)$$

Din ecuația (20) rezultă forma regulatorul PD :

$$Kp \cdot \left(1 + Td \cdot \frac{s}{\left(\frac{Td}{N}\right) \cdot s + 1} \right) \quad (23)$$

Cu valorile coeficienților: $Kp=0.1$, $Td=0.144$ și N (filtru)=3.27

În Fig. 4.5.2.2. este prezentată diagrama Bode a sistemului în buclă deschisă considerând regulatorul proiectat. Din proiectare s-a dorit o margine de fază de 50 grade dar s-a putut obține doar 38.4 grade.

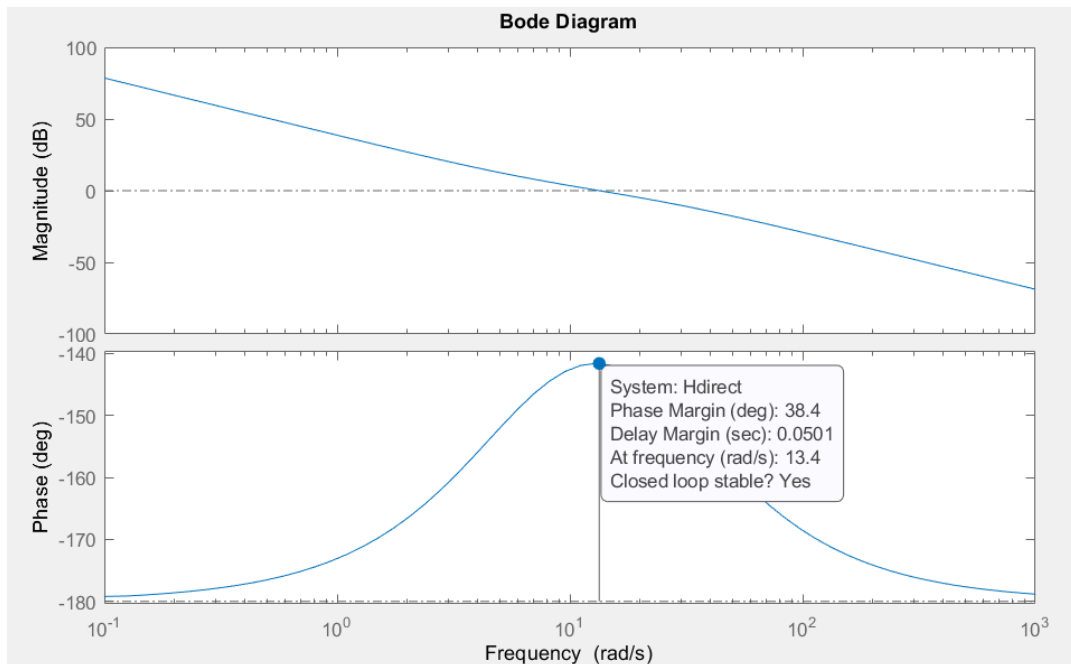


Figura 4.5.2.2 Diagrama Bode pentru Hdirect

Răspunsul indicial al sistemului este prezentat în figura următoare 4.5.2.3 cu următoarele performanțe atinse: eroare staționară la poziție egală cu 0, timpul de răspuns de 0.0785 secunde, suprareglaj la valoare de 41.93%, timpul de stabilizare de 0.5469 secunde.

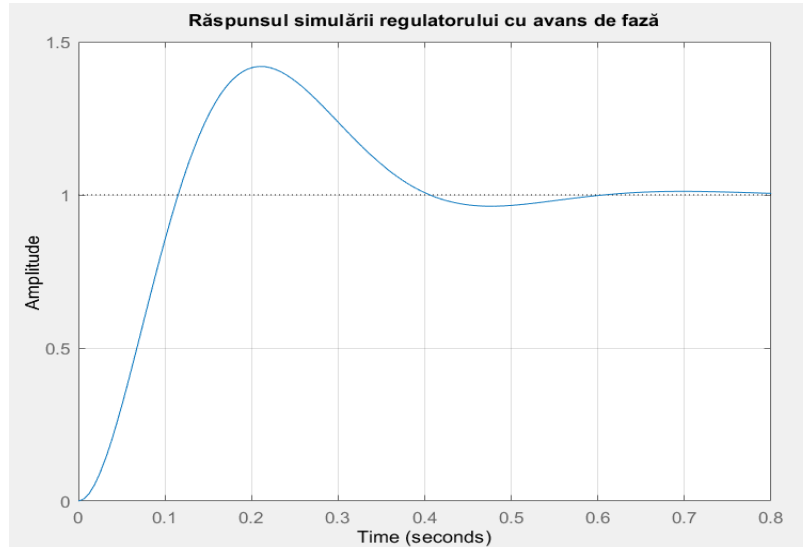


Figura 4.5.2.3 Răspunsul sistemului în buclă închisă

În mod similar s-a determinat și al doilea regulator pentru axa Ox obținându-se următorii parametrii:

$$H_{rx} = 0.1 \cdot \frac{0.1879s+1}{0.04397s+1} \quad (24)$$

Pentru testarea reguletoarelor proiectate pe standul experimental este necesară discretizarea acestora în vederea implementării pe microcontroler. Astfel ambele reguletoare au fost discretizate cu metoda zoh, la o perioadă de eșantionare de 33 ms rezultând următoarea relație de recurență din ecuația (25):

$$c[k] = 0.4721 \cdot c[k-1] + 0.4274 \cdot e[k] - 0.3746 \cdot e[k-1] \quad (25)$$

Unde $c[k]$, $e[k]$ reprezintă comanda, eroare la momentul curent și $c[k-1]$, $e[k-1]$ reprezintă comanda respectiv eroare cu întârziere de 1 tact.

4.5.3 Implementarea funcțiilor pe Arduino

Partea de declarare globală a variabilelor și funcția `void setup()` urmează aceeași structură ca în implementarea regulatorului utilizând biblioteca Arduino. Aceasta include inițializarea variabilelor necesare pentru controlul sistemului și configurarea pinilor pentru intrări și ieșiri, precum și orice alte setări necesare pentru funcționarea corectă a regulatorului.

În cadrul funcției `loop()`, care se execută ciclic, se implementează relația de recurență a regulatorului. Această relație utilizează două variabile principale: comanda (`c`) și eroarea (`e`), ambele fiind evaluate la diferite momente de timp. Relația de recurență este esențială pentru actualizarea comenzii sistemului pe baza erorilor anterioare și a comenzilor precedente, asigurând astfel un control precis și stabil al sistemului.

În partea de citire a comenzii, se definește comanda curentă `c[0]` ca fiind suma dintre comanda la momentul curent și valoarea 97. Această valoare de 97 reprezintă poziționarea de bază a brațului servomotorului, care este paralel cu axa mesei. Totuși, acest parametru trebuie ajustat în funcție de înclinarea plăcii pe care se află standul experimental, pentru a asigura o poziționare corectă și compensarea eventualelor deviații cauzate de înclinare.

Implementarea unei bucle `for{} în cod este importantă, deoarece, conform relației de recurență, comanda curentă depinde de comenzile și erorile anterioare ale standului. Această buclă permite actualizarea secvențială a comenzilor și erorilor, iterând prin valorile stocate anterior pentru a calcula noua comandă. Acest proces asigură că fiecare actualizare a comenzii ține cont de istoricul complet al sistemului, contribuind astfel la un control precis și adaptiv.`

Astfel, structura codului asigură atât inițializarea corectă a variabilelor și setărilor necesare, cât și actualizarea continuă și precisă a comenzilor sistemului pe baza unei relații de recurență bine definite. Acest lucru este esențial pentru a menține performanța optimă și stabilitatea sistemului de control. Figura 4.5.3.1

```

33 void loop() {
34   TSPoint p = ts.getPoint();
35   if (p.z > ts.pressureThreshold){
36     e[0]=500-p.y;
37     c[0]=0.894*c[1]+0.1*e[0]-0.1997*e[1]; // lead compensation Te=70ms
38
39     Servo2.write(c[0]+97);
40     delay(33);
41
42     Serial.print("Abatere = "); Serial.print(e[0]);
43     Serial.print("\ty = "); Serial.print(p.y);
44     Serial.print("\tCommand = "); Serial.println(c[0]);
45     for(int i=5;i>0;i--){
46       e[i]=e[i-1];
47       c[i]=c[i-1];
48     }
49   }
50 }
51

```

Figura 4.5.3.1 Implementare comandă în discret

4.6 Testarea standului experimental de tip bilă-masă

4.6.1 Scenariu 1 – menținere la punct fix

Pentru un sistem de control al poziției stabilizat utilizând un regulator proporțional-derivativ (PD), coeficienții de reglare sunt esențiali pentru obținerea performanțelor dorite. În cadrul acestui studiu, s-au utilizat coeficienți specifici pentru fiecare axă de control, și anume axa X și axa Y. Coeficienții aleși au fost: $K_p=0.05$ și $T_d=0.0055$ pentru axa X și $K_p=0.045$ și $T_d=0.0045$ pentru axa Y.

Punctul de referință al sistemului în simularea prezentată (Figura 4.6.1.1) a fost setat la 500. În regim staționar, eroarea staționară la poziție pentru axa X a fost de aproximativ 2.6 mm. Performanțele dinamice ale sistemului au fost caracterizate printr-un timp de stabilizare de aproximativ 4.2 secunde și un suprareglaj de 69%, cu un timp de răspuns de 0.2 secunde. Aceste valori indică un răspuns relativ rapid, dar cu un suprareglaj semnificativ, ceea ce poate fi acceptabil în funcție de cerințele specifice ale aplicației.

Pentru axa Y, performanțele sistemului au fost superioare în anumite privințe comparativ cu axa X. Eroarea staționară la poziție a fost de 0 mm, indicând o precizie ridicată în regim staționar. Suprareglajul a fost de 60%, cu un timp de stabilizare de 3 secunde și un timp de răspuns de 0.3 secunde. Aceste rezultate sugerează un sistem bine reglat pentru axa Y, cu un răspuns rapid și un control precis al poziției.

La secunda 6 s-a aplicat o perturbație sistemului, astfel constatându-se faptul că procesul este imun la perturbațiile din exterior.

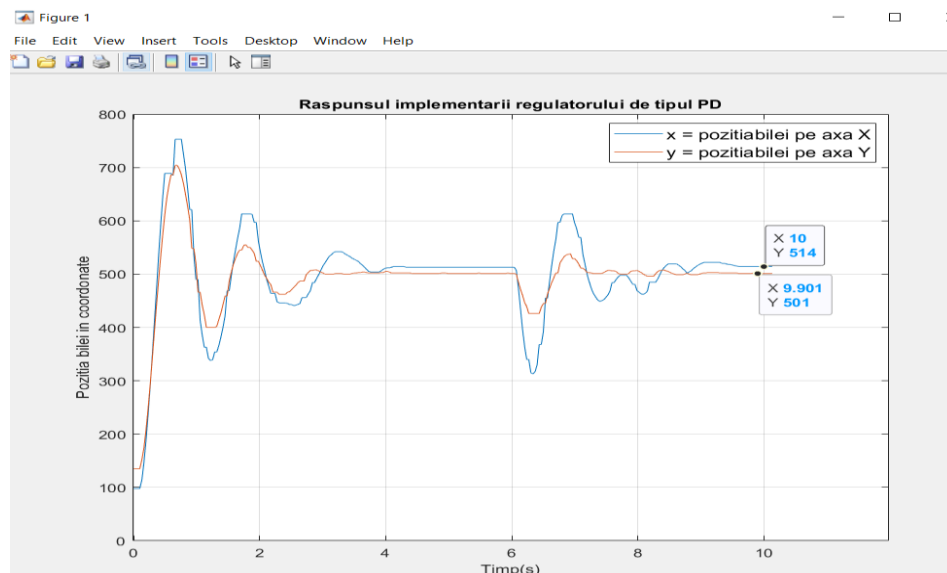


Figura 4.6.1.1 Evoluție poziție bilă considerând regularoare de tip PD – experimental

La testarea regulatorului cu avans de fază se observa mici modificări ale performanței sistemului. Are loc scăderea suprareglajului, îmbunătățirea erorii staționare la poziție dar crește timpul de stabilizare Figura 4.6.1.2

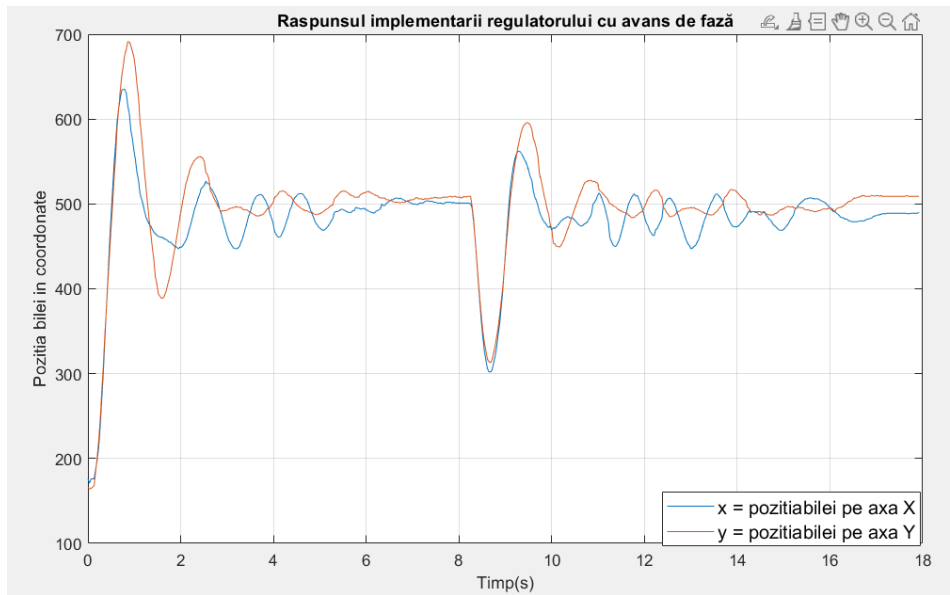


Figura 4.6.1.2 Răspunsul implementării regulatorului cu avans de fază

4.6.2 Scenariu 2 – menținerea unei traiectorii

Cu același regulator PD continuu s-a încercat urmărirea unei traiectorii de tip pătrat. În figura următoare este reprezentat ce s-a realizat. După cum se observă există o eroare staționară la poziție și destul de multe perturbații interne care modifică traiectoria bilei. Figura 4.6.2.1

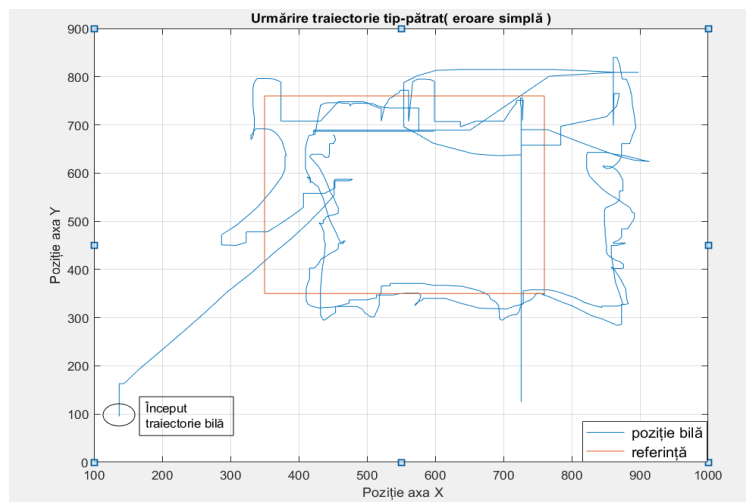


Figura 4.6.2.1 Urmărire traiectorie tip-pătrat

Pentru a reduce din perturbațiile interne de la senzor, s-a încercat o optimizare prin metoda ridicării la pătrat a erorii. După cum îi spune și numele, metoda constă în ridicarea la pătrat a erorii poziției bilei și folosirea aceluiași regulator pentru a obține valori diferite ale urmăririi poziției.

Avantajele acestei metode sunt reprezentate prin reducerea perturbațiilor de frecvență joasă în semnalele măsurate. Un alt avantaj este reprezentat de menținerea unui semnal de comandă neted. O vizualizare a aplicării metodei se află în figura 4.6.2.1 unde,

se observa o imbunatatire a urmăririi traiectoriei. Eroare la poziție este mai mică de 10 mm pentru referința dată.[6]

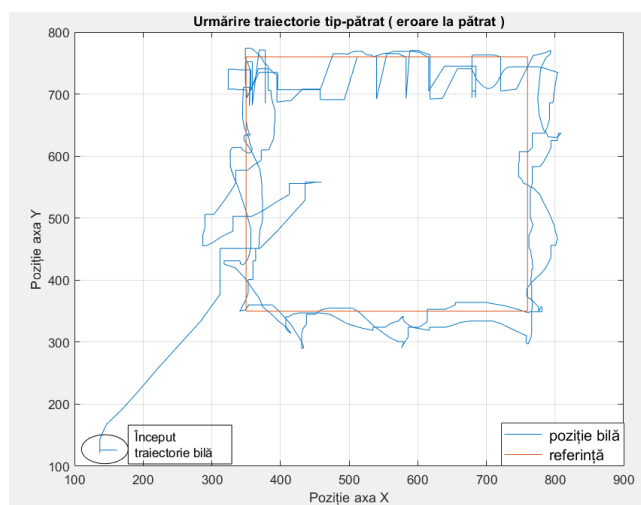


Figura 4.6.2.1 Urmărire traiectorie pătrat optimizată

Pentru figura de mai jos s-a testat urmărirea traiectoriei tip-pătrat pentru regulatorul cu avans de fază implementat discret. Eroarea maxima la poziție in urma urmăririi traiectoriei este de maxim 10 mm, Figura 4.6.2.2

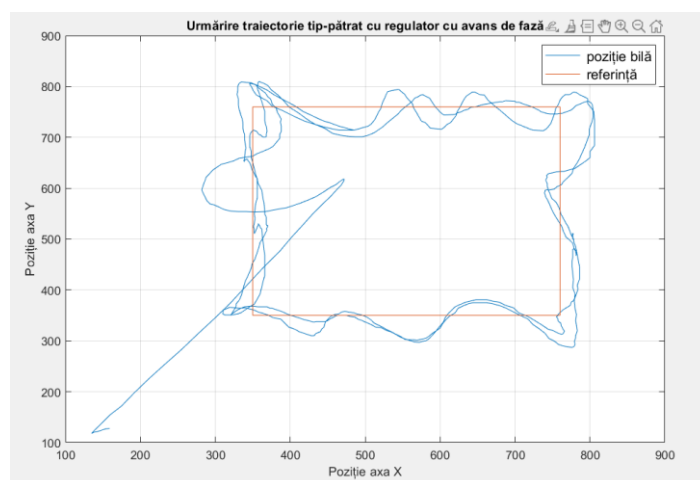


Figura 4.6.2.2 Urmărire traiectorie tip-pătrat cu regulator cu avans de fază

5 Concluzii

5.1 Rezultate obținute

În cadrul proiectului, s-a obținut un prototip pentru un sistem de tip bila-masa care respectă în totalitate toate cerințele specificate la începutul proiectului fiind prevăzut cu un sistem de control configurabil care să fie capabil să stabilizeze bila într-un punct dorit în planul xOy al mesei sau pe o traiectorie impusă de tip pătrat. A fost realizată analiza și proiectarea sistemului din punct de vedere mecanic, hardware și software fiind selectate toate componentele necesare. De asemenea, s-au proiectat cu succes regulatoare de tip PID care asigură menținerea bilei la poziția dorită chiar și în prezența unor perturbații. Comparativ cu alte lucrări de specialitate, regulatorul cu avans de fază proiectat în acest proiect a prezentat o eroare staționară la poziție mai mică, indicând o precizie îmbunătățită în menținerea poziției bilei.

Se poate concluziona că rezultatele obținute demonstrează funcționalitatea sistemului proiectat, obiectivele proiectului fiind îndeplinite 100%.

Ca și contribuții personale aduse acestui prototip de proiect bilă-masă enumerăm:

- Analiza și proiectarea prototipului.
- Crearea modelului pentru imprimare 3D a proiectului de tipul bilă-masă
- Proiectarea standului experimental
- Realizarea și printarea pieselor 3D
- Asamblarea scheletului structurii proiectului
- Realizarea schemei electrice, mecanice și implementarea lor
- Procesarea datelor de la traductor și transformarea acestora în coordonate carteziane
- Realizarea celor 2 regulatoare și compararea performanțelor pe 2 tipuri de referință distincte

5.2 Direcții de dezvoltare

Ca direcții de dezvoltare pentru partea de control, necesitatea explorării mai multor tipuri de regulatoare implementate prin relații de recurență pentru a evalua diverse performanțe și a îmbunătăți procesul. Această abordare va permite o analiză comparativă a eficienței diferitelor regulatoare, identificând cele mai adecvate soluții pentru aplicația specifică. Prin testarea și optimizarea reguletoarelor PD, PID și potențial altele, se poate obține o ajustare fină a parametrilor de control, ducând la îmbunătățirea stabilității și performanței generale a sistemului.

Pentru dezvoltarea secțiunii experimentale, se propune integrarea unui giroscop pentru a ajusta automat suportul plăcii astfel încât să fie menținută în poziția de 0 grade față de normala la suprafață. Această integrare va permite stabilizarea automată prin utilizarea datelor furnizate de giroscop pentru a corecta în timp real orice deviere de la poziția dorită.

6 Referințe bibliografice

- [1] Roboholic, 2010, [Online]. Available:
<https://www.roboholicmaniacs.com/product-page/ball-on-plate>
- [2] V. Mureșan, M. Abrudean, "Noțiuni introductive", " *Conducerea proceselor industriale-Curs didactic* ", Targu-Lăpuș, Silviu Hodiș, 2017, pp. 1-18
- [3] MYLAB , 2017. [Online]. Available:
<https://mylab.ro/product/sistem-ball-plate>
- [4] LQ control of Ball and Plate system controlled by Arduino MEGA 2560, 2016.[Online]. Available:
<https://projecthub.arduino.cc/davidhamor/ball-and-plate-6bf158>
- [5] Courseware, " *Ball Balancing table* ", 2014 Acrome Inc., Maslak Istanbul
- [6] 3DOF Ball on Plate Using Closed Loop Stepper Motors, 2017, [Online]. Available
<https://www.instructables.com/3DOF-Ball-on-Plate-Using-Closed-Loop-Stepper-Motor/>
- [7] PID Controlled Ball Balancing Stewart Platform, 2018, [Online]. Available:
<https://www.instructables.com/PID-Controlled-Ball-Balancing-Stewart-Platform/>
- [8] D. D. Ruscio, C. Dalen, *Tuning PD and PID Controllers for Double Integrating Plus Time Delay Systems*, Modeling, Identification and Control, Vol. 38, No. 2, 2017
- [9] AN10675, Interfacing 4-wire and 5-wire resistive touchscreens to the LPC247x, 2008, [Online]. Available:
<https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10675.pdf>
- [10] T. Zhan, " *Recommendation Of RLC Circuit and Its Uses in Electronic Devices* ", Highlights in Science, Engineering and Technology, vol.81, 2024
- [11] M. O. Tătar, " *Elemente si cuple cinematice* " Curs 1, Automatica
M. O. Tătar, " *Cuple cinematice compuse, lanțuri cinematice, mecanisme* ", Curs 2, Automatica
- [12] A. H. Frank, M. Tjernstrom, *Construction and theoretical study of a ball balancing platform, Degree project in tehnology*, First Cycle, 15 Credits Stockholm, Sweden 2019
- [13] GrabCad Community, 2022, [Online], Available:
<https://grabcad.com/library/ball-on-plate-1-0-1>
- [14] K. J. Astrom, T. Hagglund. *Advanced PID Control*, Triangle Park, NC: International Society of Automation, 2006 pp. 77