



Universitatea
Transilvania
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ
Facultatea: Design de Prodsu și Mediu

Ing. Cezar FRÎNCU

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific
Prof.dr.ing. Ioan Stroe

BRAȘOV, 2024

Ing. Frîncu Cezar-Ioan

TEZĂ DE DOCTORAT

TITLU (română): Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

TITLU (engleză): Self-adaptive prehension system for solid pieces with irregular shapes.

Domeniul de doctorat: Inginerie MECANICĂ

Comisia de analiză a tezei:

Prof.univ.dr.ing.– Eneșca Alexandru, Prodecan Facultatea de Design de Produs și Mediu,
Universitatea Transilvania din Brașov

Prof.univ.dr.ing. – Stroe Ioan, Universitatea Transilvania din Brașov

Prof.univ.dr.ing. – Doroftei Ioan, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

Prof.univ.dr.ing. – Pîslă Doina, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Prof.univ.dr.ing. – Zamfira Sorin, Universitatea Transilvania din Brașov

CUPRINS

CUPRINS	3
LISTA DE NOTAȚII.....	5
MULȚUMIRI	6
INTRODUCERE.....	7
1. SISTEME DE PREHENSIUNE. STADIU ACTUAL	8
1.1. Studiul Sistemelor complexe de prehensiune cu contact	8
1.1.1. Prehensoare adaptive	8
1.1.2. Prehensoare auto-adaptive	9
1.2. Concluzii	10
2. PROIECTAREA MODULULUI DE PREHENSIUNE CU MIȘCARE PLAN PARALELĂ	11
2.1. Proiectarea schemei cinematice a modulului de prehensiune	11
2.1.1. Calculul forței necesare prehensării	14
2.2. Modelarea 3D a modulului proiectat	16
2.3. Prototiparea virtuală a modulului	17
2.3.1. Importarea și simularea modulului prehensor în software-ul Adams	17
2.3.2. Analizarea mișcării și simularea grafică în programul Adams	17
2.4. Analiza structurală a modulului și determinarea stării de tensiune a structurii.....	18
2.4.1. Selectarea și analiza componentelor mecanice ce sunt supuse uzurilor.....	18
2.4.2. Aplicarea și descompunerea forțelor asupra comeponentelor mecanice ce realizează mișcări de rotație.....	19
2.4.3. Aplicarea și analiza forțelor asupra componentelor mecanice ce realizează o mișcare de translație orizontală	21
2.5. Concluzii	23
3. PROIECTAREA PREHENSORULUI AUTO-ADAPTIV.....	24
3.1. Proiectarea 3D a prehensorului autoadaptiv	24
3.2. Studiul adaptivității sistemului de prehensiune.....	26
3.3. Realizarea constructivă a prehensorului	29
3.4. Realizarea și implementarea software în vederea testării modulelor	30
3.5. Studiul vibrațiilor modulelor antrenate coaxial	32
3.5.1. Vibrațiile obținute în timpul mișcării modulelor	33
3.5.2. Reprezentarea grafică și interpretarea datelor	34
3.6. Concluzii	37
4. MODIFICAREA ȘI IMPLEMENTAREA STRUCTURALĂ A MODULULUI PREHENSOR ÎN URMA CONCLUZIILOR	38
4.1. Modificarea schemei cinematice	39
4.2. Calculul matematic în vederea diminuării raportului de transmitere	40
4.3. Analiza vibrațiilor exercitate asupra modulelor după modificări.....	42
4.4. Diferențele amplitudinilor modulelor pe cele 3 direcții măsurate.	43
4.5. Concluzii	44
5. PROIECTAREA SISTEMULUI SENZORIAL DE PREHENSARE.....	45
5.1. Dezvoltarea arhitecturii logice a sistemului senzorial în vederea realizării autoadaptivității	45
5.2. Prezentarea sistemului senzorial.	47
5.2.1. Descrierea procesului de strângere a sensorului.....	47
5.3. Testarea conceptuală a sensorului de alunecare	48
5.3.1. Realizarea software a sistemului senzorial.	48
5.3.2. Structura encoderului rezistiv și semnalele generate.....	48

5.3.3. Modalitatea de funcționare a senzorului de alunecare rezistiv	49
5.4. Executarea și integrarea fizică a senzorului pe fiecare modul prehensor respectând structura cinematică	50
5.5. Reprezentarea prehensorului în forma actualizată cu sistemul senzorial de alunecare	51
5.6. Determinarea poziționării senzorului de forță cu metoda elementului finit.....	53
5.7. Integrarea structurală a senzorilor de forță în vederea autoadaptivității	55
5.8. Proiectarea schemei electronice pe modul, după noua arhitectură	58
5.9. Determinarea forțelor de strângere în vederea prehensarii autoadaptive	59
5.10. Determinarea valorilor unghiulare ale senzorului de alunecare în vederea autoadaptivității	62
5.11. Concluzii	66
6. DEZVOLTAREA ȘI REALIZAREA ADAPTIVITĂȚII PREHENSORULUI.....	67
6.1. Dezvoltarea arhitecturii logice a sistemului de prehensiune în vederea realizării autoadaptivității	67
6.2. Realizarea structurii de comunicație Mastre to Slave.....	67
6.3. Structura logică a comunicație binare Master to Slave	67
6.4. Proiectarea și execuția schemei panoului de comandă	70
6.5. Dezvoltarea software a prehensorului în vederea autoadaptivității	70
6.5.1. Configurația comunicațiilor digitale a controler-ului	70
6.5.2. Stabilirea parametrilor senzoriali.....	71
6.5.3. Realizarea software-ului autoadaptiv	72
6.5.4. Dezvoltarea aplicației Android pentru intrefațarea panoului de comandă.....	74
6.6. Simularea reală a autoadaptivității	76
6.7. Concluzii	78
7. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....	80
7.1. Concluzii generale	80
7.2. Contribuții personale.....	80
7.3. Diseminarea rezultatelor.....	82
7.4. Direcții viitoare de cercetare.....	82
BIBLIOGRAFIE.....	84
ANEXE	86
Anexa 1. Valorile vibrațiilor măsurate pentru fiecare modul al prehensorului	86
Anexa 1.1. Vibrații în modulul 1.....	86
Anexa 2. Valorile vibrațiilor măsurate pe cele 3 axe a șasiului pe care sunt prinse cele 5 module ale prehensorului	87
Anexa 3. Date colectate ale fazelor forțelor pentru fiecare modul al prehensorului.....	88
Anexa 3.1. Modul 1 – Faza 1	88
Anexa 4. Date colectate pentru etapele unghiulare ale fiecărui modul al prehensorului.....	90
Anexa 4.1. Modul 1 – etapa 1	90
Anexa 5. Forma finală a prehensorului	92

LISTA DE NOTAȚII

Simbol	Descriere
$M_{t_{ei}}$	Momentul de calcul pe melc
M_t	Momentul motor de torsiune
M_{pp}	Motor pas cu pas
P_e	Pasul elicei melcului corespunzător diametrului de rostogolire
β	Unghiul de înclinare a spirei melcului
d_{r1}, r_{r1}	Diametrul, respectiv raza de rostogolire ale melcului
F	Forță
p	Pasul axial (aparent) al melcului
s	Numarul de începuturi al melcului
D_{min}	Diametrul minim de prindere
D_{max}	Diametrul maxim de prindere
C_m	Cursa maximă a modulului
F_{min}	Forța minimă de tracțiune a obiectului
$F_{contact}$	Forța de frecare dintre bacul modulului și suprafața obiectului prehensat.
$s_1, s_2, s_3,$ s_4, s_5, s_6	Laturi ale paralelogramului
$a_1, a_2, a_3, a_4,$ a_5, a_6, a_7, a_8	Unghiuri din structura cinematică
l_1, l_2, l_3	Distanțe variabile
$A, B, C, D,$ F, O, O'	Cuple de rotație
F, H	Cuple de translație
F_c	Forța compusă
F_r	Forța de reacțiune
F_x, F_y, F_z	Forțe rezultante pe direcțiile x, y, z
M_x, M_y, M_z	Momente rezultante pe direcțiile x, y, z
R	Raport transmitere
F_a	Forța axială
H_I, H_{II}, H_{III}	Reacțiuni datorate forței F_a
$V_{I_1}, V_{II_1}, V_{III_1}$	Reacțiuni datorate forței F_r
$V_{I_2}, V_{II_2}, V_{III_2}$	Reacțiuni datorate forței F_p
$F_{r_1}, F_{r_{II}}, F_{r_{III}}$	Încărcarea rezultantă

MULȚUMIRI

Cu prilejul finalizării acestui stagiu doctoral, mă simt marcat de fericire, emoții și împlinire, sentimente care provin atât din mulțumirea profesională, cât și personală, a studiilor doctorale.

Adresez profunde mulțumiri domnului profesor Ioan STROE, coordonatorul acestei teze de doctorat, pentru îndrumarea științifică și sprijinul acordat pe tot parcursul redactării prezentei lucrări, deplina încredere, disponibilitatea și colaborarea profesionistă pe toată perioada stagiară.

Sincere mulțumiri, domnilor profesori Luciana CRISTEA, Ionel STAREȚU, Cătălin ALEXANDRU, pentru acceptul de a fi membri în comisia de analiză, pentru bunăvoința și răbdarea cu care au analizat această lucrare, pentru comentariile și sugestiile transmise la susținerea referatelor.

În același timp, doresc să mulțumesc colegilor, Constantin TORCĂTORU, Lucian ULMANU, Alexandu DIACONU, Marius BĂSESCU, cât și a celorlalți colegi din echipa ARKA, pentru încurajările în momentele dificile, sfaturile și activitățile din perioada stagiară.

Nu în ultimul rând, doresc cu această ocazie, să mulțumesc soției mele, părinților, surorii și prietenilor apropiați, pentru că m-au sprijinit și au fost alături de mine pe tot parcursul redactării acestei teze de doctorat.

Vă mulțumesc!
Cu aleasă considerație,
Drd.ing. Cezar FRÎNCU

INTRODUCERE

Utilizarea roboților industriali într-o industrie modernă pune accent foarte mare pe prinderea robotică pentru a înlocui oamenii și multe dintre erorile pe care aceștia le generau din neatenție sau oboseală acumulată. În același timp, prin implementarea roboților industriali se folosesc tot felul de sisteme de prindere precum prehensoarele. Tehnologia robotică este în special relativă în țările cu venituri mari și mijlocii, unde forța de muncă manuală este costisitoare. În astfel de cazuri economice beneficiile pot fi făcute prin înlocuirea muncii umane cu manipularea robotică autonomă.

Roboții au fost introduși în industrie în anul 1912 de către firma Unimation™ și implementați în cadrul companiei General Motors.

Roboții industriali de manipulare sunt esențiali în automatizarea proceselor industriale. Acești roboți sunt proiectați să manipuleze, să mute și să plaseze obiecte în mod precis și eficient, reducând astfel nevoia de intervenție umană în sarcini repetitive sau periculoase. Ei joacă un rol crucial în creșterea productivității și îmbunătățirea calității în diverse industrii.

Toți roboții de manipulare sunt concepuți cu un sistem de gripper sau prehensor, în vederea manipulării obiectelor. Aceste sisteme de prindere sunt implementate în funcție de domeniul de activitate, de tipul de obiect pe care îl prind și de mediul în care lucrează.

Prehensoarele reprezintă structuri mecatronice avansate utilizate

predominant de roboții industriali pentru efectuarea operațiunilor de prindere și manipulare a obiectelor, transferându-le dintr-o poziție de start într-o poziție finală necesară pentru diferite procese tehnologice automatizate. Aceste sisteme se clasifică, în funcție de tipul forței de prehensiune aplicate, în trei categorii principale: mecanice, cu vacuum și magnetice.



Figura. 1.01. Fabrică modernă de producție auto cu roboți

1. SISTEME DE PREHENSIVITATE. STADIU ACTUAL

Sistemele de prehensiune au fost preluate din viața reală, unde avem animale și insecte ce descriu prin mișcările lor un prehensibil, acestea fiind denumite sisteme de prehensiune naturale (Figura. 1.1).

Prehensiunile sunt sisteme mecatronice complexe cu ajutorul cărora se pot prinde obiecte de diferite forme și dimensiuni. Ele pot fi cu două degete, de tipul gripper, dar și cu 3, 4 sau 5 degete constituind tipuri de prehensiune, similar antropomorfelor care imită mâna umană.

În general, toate prehensiunile îndeplinesc aceeași funcție, și anume de a „captura” obiectul și de a-l strânge controlat sau necontrolat. Parametrii variabili pe care îi poți întâmpina la sistemele de prehensiune este forța de strângere, suprafața de aderență dintre obiect și prehensibil și geometriile prehensibile [2].

Din punct de vedere al acționării, prehensiunile sunt de mai multe tipuri. În funcție de aplicabilitatea și de obiectul care trebuie preluat, prehensiunile pot fi acționate în mai multe metode:

- **Cu metodă de prehensiune cu contact** – aceste prehensiuni sunt rezistente și pot prelua obiecte rigide cu brațele sau degetele;
- **Cu metodă de prehensiune intruziv** – cu această metodă se poate prelua obiecte din sticlă, fibră de sticlă, carbon;
- **Cu metodă de prehensiune astrigent** – poate fi vacuumic, magnetoadeziv, electroadeziv și se folosește pentru a prelua obiecte neporoase, materiale subțiri, table;
- **Cu metoda de prehensiune contigüe** – poate fi termic, chimic, cu tensiune superficială și se folosește pentru a prelua obiecte precum textile, carbon, obiecte mici și ușoare.

În general, fiecare metodă de prehensiune are o aplicabilitate specifică, dar sunt și cazuri în care o metodă de prehensiune poate fi utilizată în multe tipuri de procese pentru a prelua diverse obiecte de diferite materiale [3].

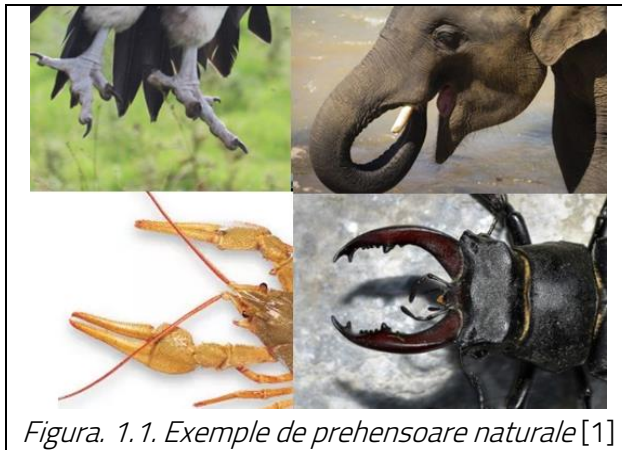


Figura. 1.1. Exemple de prehensiune naturale [1]

1.1. Studiul Sistemelor complexe de prehensiune cu contact

1.1.1. Prehensiune adaptivă

Sistemele de prehensiune adaptivă sunt sisteme mecatronice complexe în care sunt incluse sisteme senzoriale, mecanice și sunt programabile.

Aceste prehensiuni adaptivă au capacitatea de a lua anumite decizii individuale, prin urmare nu sunt pre-programabile. Ele se orientează în spațiu în funcție de mai mulți parametri generați de sistemul în care sunt implementate. Aceste sisteme mecatronice sunt create pentru manipularea obiectelor în siguranță, controlând cuplul și forța de strângere.

Oamenii au capacitatea de a prinde un obiect și de a ține cont de parametrii externi. Ei pot prinde controlat în funcție de greutatea și de aderența la atingere dintre obiect și piele. Acest lucru a fost foarte bine studiat, iar multe sisteme au fost realizate încercând să imite toate aceste lucruri.

Prehensiunile cu degete diferă în funcție de numărul de articulații acționate și neactualizate, de cuplarea diferitelor îmbinări și de modul în care se transmite cuplul de antrenare acestor articulații.

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

Toate aceste dispozitive de prindere au în comun sub-aționarea, iar auto-adaptarea rezultă într-o reducere a greutateii și într-un dispozitiv de prindere simplu controlabil cu capacitatea de a înțelege forma diferitelor obiecte. Ele mai au capacitatea de a se adapta la diferite suprafețe și forme pentru prinderea obiectelor.

La început, aceste sisteme au fost create pentru prinderea controlată a obiectelor fragile, unde forța trebuie foarte bine determinată.

Dispozitivul de prindere Roboticq 2-Finger Adaptive are două versiuni, 85 și 140. Versiunea 2-Finger arată redimensionarea pentru obiecte de diferite dimensiuni (**Eroare! Fără sursă de referință.**) [10].

Un exemplu interesant al utilizării unei tehnologii adaptive de prindere pe care Festo a dezvoltat-o se observă în Figura. 1.2, unde obiectele țintă sunt de formă variabilă. Pe lângă aceasta, natura fragilă a becurilor necesită un prehensor să le gestioneze cu grijă. Ele trebuie să fie ținute destul de ferm pentru a nu aluneca din ghearele prehensorului și în același timp, acestea nu trebuie zdrobite de o aderență puternică.

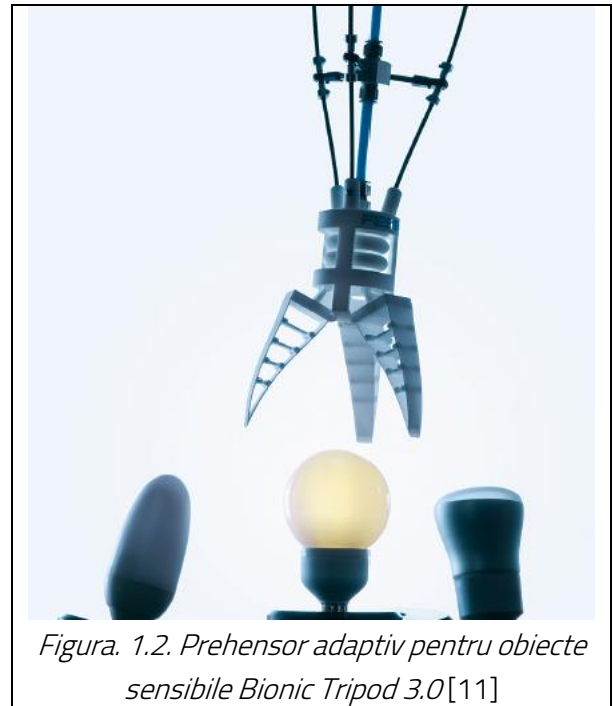


Figura. 1.2. Prehensor adaptiv pentru obiecte sensibile Bionic Tripod 3.0[11]

De asemenea, acest lucru poate fi valabil în industria alimentară, unde pierderile economice ar putea fi evitate dacă manevrarea produsului nu ar duce la distrugere sau deteriorare [4].

Prehensorul cu un sistem multifuncțional cu 3 degete SCHUNK SDH se mulează în formă. Acest sistem se potrivește și pentru obiectele sensibile cu gaură, unde se fixează cu o forță controlată în găuri chiar dacă acestea sunt extrem de largi [11].

Acest prehensor adaptiv este capabil să prehenseze diferite obiecte și poate să apropie degetele până la un antrax de 57,2 mm. Din acel moment, sistemul poate jongla doar din articulațiile superioare pentru a putea apropia bacurile, după cum se poate observa în Figura. 1.3.

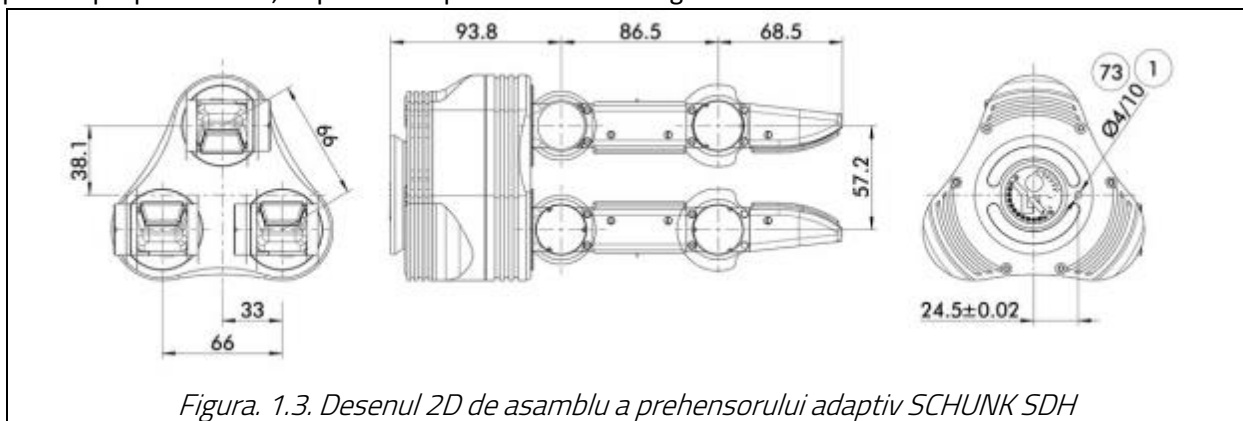


Figura. 1.3. Desenul 2D de asamblu a prehensorului adaptiv SCHUNK SDH

1.1.2. Prehensoare auto-adaptive

În urma cercetărilor s-a descoperit cea mai avansată aplicație în domeniul prehensoarelor realizat de Marc Manz și Sebastian Bartsch. Gripperul este proiectat ca un modul care trebuie montat pe diferite manipuloare. Această cerință a condus la alegerea acționării cu un motor electric în loc de unul hidraulic sau de sisteme pneumatice. Mai mult decât atât, senzorii pentru detectarea obiectelor, controlul forței de prindere și măsurarea forțelor între dispozitivul de prindere și manipulator sunt integrate în sistem [2].

1.2. Concluzii

- Trebuie realizat un sistem de prehensiune adaptiv care nu își modifică gabaritul în timpul funcționării;
- Este necesară deplasarea paralelă a bacurilor față de orizontala mesei de lucru;
- Fără un sistem senzorial complex nu se poate realiza un sistem adaptiv;
- Este foarte important să se controleze forțele asupra obiectului;

2. PROIECTAREA MODULULUI DE PREHENSIVITATE CU MIȘCARE PLAN PARALELĂ

Prehensivul autoadaptiv permite prinderea de obiecte de dimensiuni mici, geometrii diferite și grosimi reduse prin mișcarea paralelă a prehensivului cu suprafața pe care obiectul este amplasat în comparație cu alte sisteme de prehensiune care descriu în deplasare pentru prinderea obiectelor arce de cerc, motiv pentru care nu servește să prindă obiecte de dimensiuni reduse [12], [12], [13].

Prehensivul are un control autoadaptiv prin forță, el poate prehensa obiecte de diferite forme, nu doar obiecte de forme regulate deoarece fiecare braț al acestuia este controlat independent și acționat în funcție de forța de prehensiune aplicată obiectului, astfel încât obiectul să nu alunece în timpul deplasării [14]–[16].

Prehensivurile mecanice cu 5 degete sunt sisteme complexe ce imită o mână umană, iar mâna este un prehensiv ideal. Prehensivurile au rolul de a transporta obiecte într-un mod controlat și bine determinat într-un spațiu definit. Condițiile impuse ale acestui tip de prehensiv este planitatea față de obiectul prehensat și de masa de lucru, iar deplasarea să fie foarte precisă, cu 1 kg prehensat [17]–[20].

Obiectivul propus pentru acest capitol este: **Analiza și proiectarea unui prehensiv autoadaptiv cu cinci degete independente, utilizând o configurație cinematică de tip paralelogram pentru a asigura adaptabilitate, precizie și flexibilitate în manipularea obiectelor de diferite forme și dimensiuni. S-a avut în vedere modelarea 3D, simularea cinematică și analiza structurală detaliată pentru a optimiza design-ul unui prehensiv cu scopul aplicării în robotică și automatizare.**

2.1. Proiectarea schemei cinematice a modului de prehensiune

Pentru stabilirea unui concept este nevoie de detaliile necesare pentru realizarea acestuia. În cazul realizării unui modul prehensiv este necesar să se stabilească principiul și modul de funcționare. Conform condițiilor impuse, sistemul prehensiv creat îndeplinește funcția de paralelism față de obiectul prehensat și funcția de paralelism față de masa de lucru pe care stă obiectul.

Date intrare:

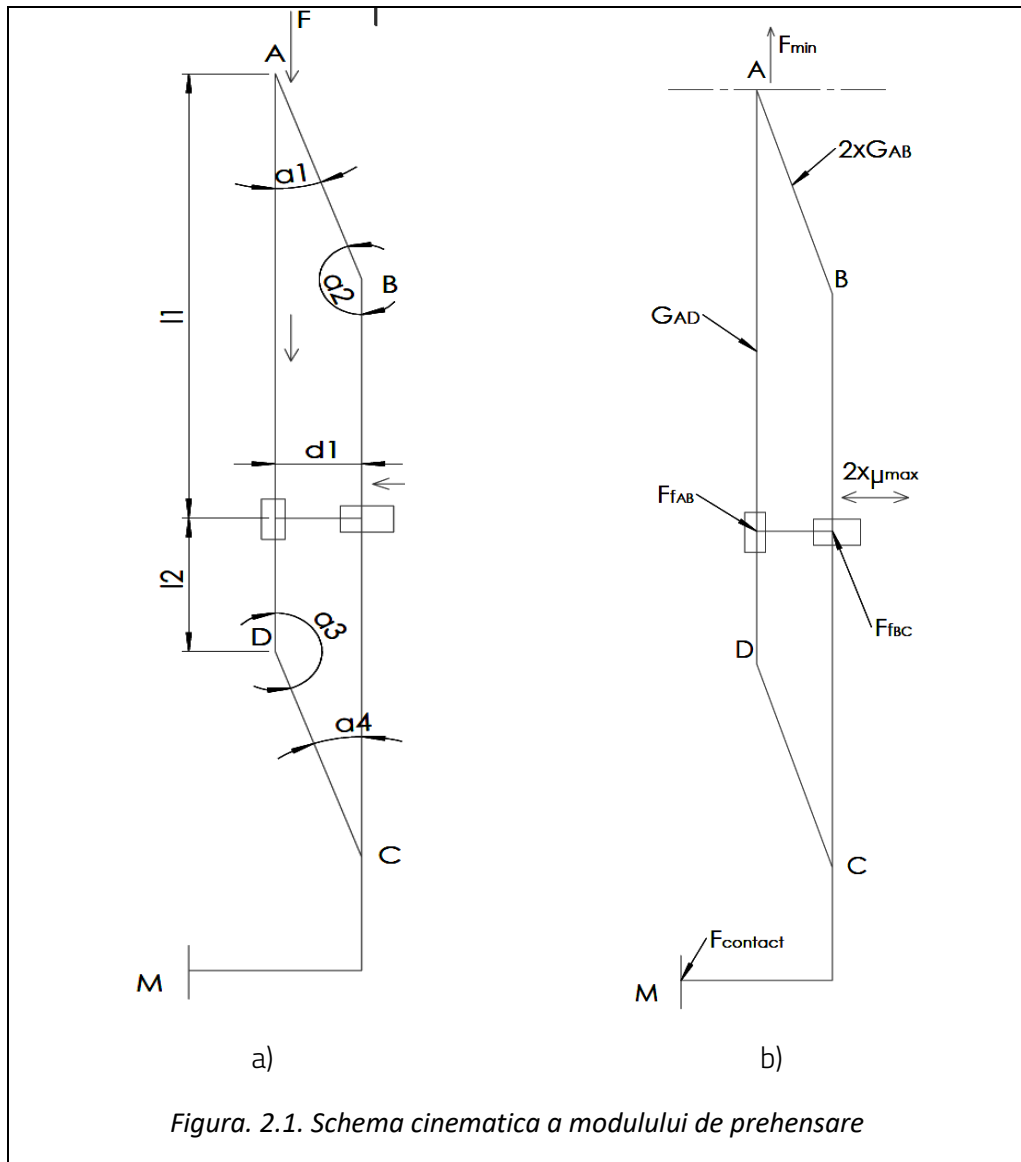
$D_{\min} = 9$ mm, pentru diametrul minim de prindere,

$D_{\max} = 90$ mm, pentru diametrul maxim de prindere.

Ipoteze:

- Dispozitivul trebuie să fie proiectat în așa fel încât să poată efectua prehensiunea de corpuri caracterizate de forme neregulate.
- Obiectele supuse prehensiunii trebuie să aibă o masă maximă de 1 kilogram.
- Dispozitivul trebuie să fie conceput pentru a putea prehensa obiecte cu o înălțime minimă de 2 mm.

În urma studiilor s-au concluzionat următoarele:



- Dispozitivul de prehensiune va fi conceput cu 5 brațe;
- Cele 5 brațe ale prehensorului sunt independente din punct de vedere mecanic, electric și software;
- Descrierea mișcării celor 5 brațe ale prehensorului este o mișcare plan-paralelă.

Cursa maximă a modului:

$$C_m = \frac{D_m}{2} = \frac{90}{2} = 45 \text{ mm}, \quad (2.1)$$

- În scopul de a realiza mișcarea plan paralelă, se va implementa o configurație cinematică de tip paralelogram, caracterizată prin prezența a două puncte de translație fixe dispuse central.

$$\begin{cases} \overline{AB} = \overline{DC}, \\ \overline{AD} = \overline{CB}. \end{cases} \quad (2.2)$$

unde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{AB}, \overline{BC}, \overline{AD}, \overline{DC} = \text{fixe}, \\ d_{1\min} = \text{variabil}, \\ L_1 = \overline{AO} = \text{variabil}, \\ L_2 = \overline{OD} = \text{variabil}. \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Distanța minimă dintre cele două laturi ale paralelogramului \overline{AD} și \overline{BC} este atinsă atunci când sistemul mecanic se află într-o poziție închisă:

$$d_{1\min} = 27 \text{ mm}, \quad (2.4)$$

Distanța maximă dintre cele două laturi ale paralelogramului \overline{AD} și \overline{BC} este atinsă atunci când sistemul mecanic se află într-o poziție deschisă:

$$d_{1\max} = 73 \text{ mm}, \quad (2.5)$$

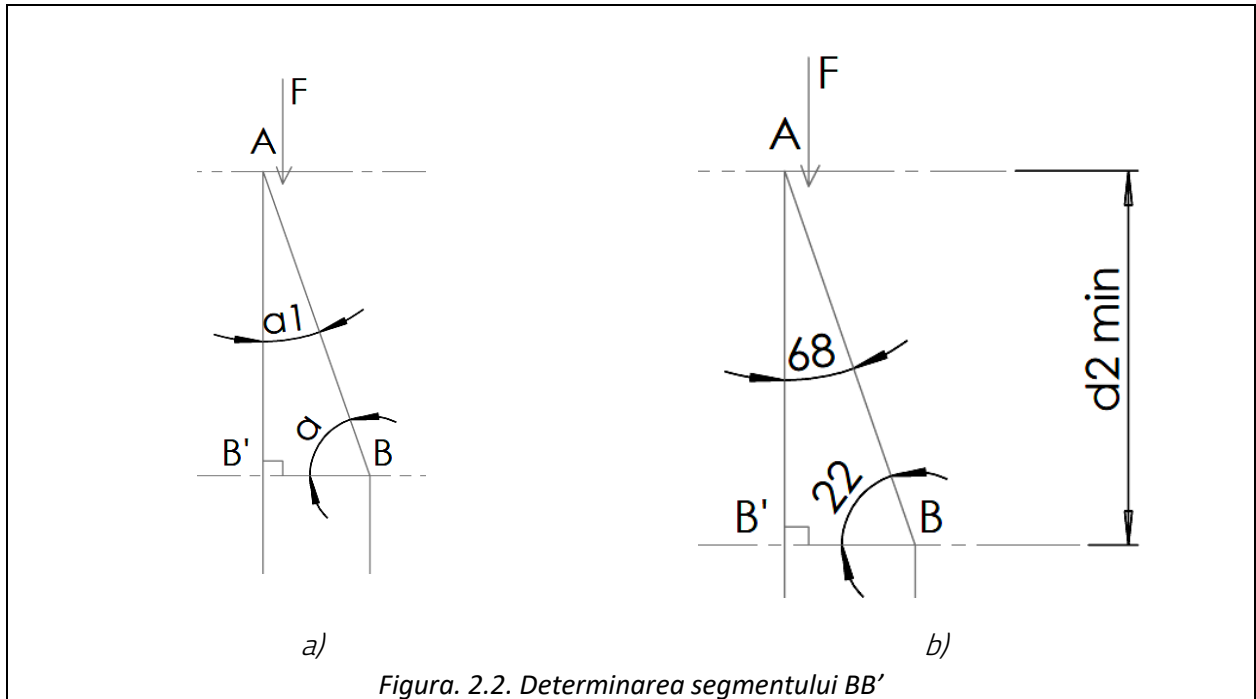


Figura. 2.2. Determinarea segmentului BB'

- $d_{1\min}$ - este determinată de componentele mecanice care sunt în mișcare, această valoare fiind variabilă.

$$d_{1\min} = 27 \text{ mm} \Rightarrow \overline{AB} = \overline{DC} > d_{1\max}. \quad (2.6)$$

$$\text{Din } ABCD \Rightarrow \square a_1 \text{ din } A, \square a_4 \text{ din } C \quad (2.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \square a_1 = \square a_3 \\ \square a_2 = \square a_4 \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Pentru o mișcare cursivă a segmentului AB, el nu poate fi \perp pe BC și trebuie să fie $> 20^\circ$, $\alpha > 20^\circ$:

$$\overline{BB'} = d_{1\max} = 75 \text{ mm}, \text{ pentru } \alpha = 20^\circ, \quad (2.9)$$

$$a_1 = 70^\circ, \text{ pentru } \square B' = 90^\circ, \quad (2.10)$$

$$\cos 20^\circ = \frac{75}{AB} \Rightarrow \overline{AB} = \frac{75}{\cos 20^\circ} = 80.5 \text{ mm}, \quad (2.11)$$

Pentru o marjă de eroare se va aproxima:

$$\overline{AB} = 82 \text{ mm} \Rightarrow \cos \alpha = \frac{73}{82} = 0.89 \quad (2.12)$$

$$\text{pentru } \arccos 0.89 \Rightarrow \alpha \square 22^\circ. \quad (2.13)$$

$$82^2 = 75^2 + \overline{AB}'^2 \quad (2.14)$$

Pentru poziția de retras, unde $d_1 = \overline{BB}' = 30 \text{ mm}$:

$$\Rightarrow \begin{cases} \overline{AB} = 82 \text{ mm}, \\ \overline{AB}' = 33 + 45 = d_2, \\ \overline{AB} = 78 \text{ mm}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Din punct de vedere structural, $\overline{AD} \square \overline{BC}, \overline{AD} = \overline{BC}$, pe toată deplasarea și contează din punct de vedere cinematic.

2.1.1. Calculul forței necesare prehensării

Calcul cuplu, accelerație, deplasare.

Greutatea maximă este de 1kg pentru un sistem de prehensiune cu 5 module, greutatea minimă de ridicare este de 1000g.

$$\frac{1000}{2} = \frac{200 \text{ g}}{\text{modul}}. \quad (2.16)$$

Forța minimă de tracțiune a obiectului luând în calcul ca inerția $i = 0$ și frecările $\mu = 0$.

$$F_{\min} = 0.2 \text{ N}. \quad (2.17)$$

În sistemul cinematic:

$$F_{\min} = F_{\text{contact}} + G_{\text{structura}} + F_{\text{frecare}} \quad (2.18)$$

În calcul se neglijează forța de frecare în lagărele cu rulmenți din punctele de rotație A, B, C, D, acestea având un coeficient de frecare de $\mu = 0.0010 \mu\text{m}$.

$$F_{\min} = G_{AD} + F_{f_{AD}} + F_{f_{BC}} + F_{\text{contact}} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} F_{\min} &= 9.8 \cdot m_{AD} + 0.04 \cdot m_{AD} + 2 \cdot 9.8 \cdot m_{AB} + 0.08 \cdot m_{BC} \\ &= (9.8 + 0.04) \cdot m_{AD} + 18 \cdot m_{AB} + 0.08 \cdot m_{BC} \\ &= 9.84 \cdot m_{AD} + 18 \cdot m_{AB} + 0.08 \cdot m_{BC} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} F_{f_{BC}} &= 2\mu mg \\ &= 2 \cdot 0.004 \cdot m \cdot 9.89 = 0.08 \cdot m_{BC} \text{ [N]}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Coeficientul de frecare dintre cauciuc și oțel este: $\mu_c=0.3$

Pentru a putea ridica obiectul, forța minimă de tracțiune (F_{\min}) trebuie să fie mai mare ca forța de contact (F_{contact}):

$$\begin{aligned} F_{\min} &> F_{\text{contact}}, \\ F_{\text{contact}} &> G_{\text{obiect}}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$F_{\text{contact}} = \mu_c \cdot m_{\text{obiect}} \cdot g = 0.588 \text{ [N]} \quad (2.23)$$

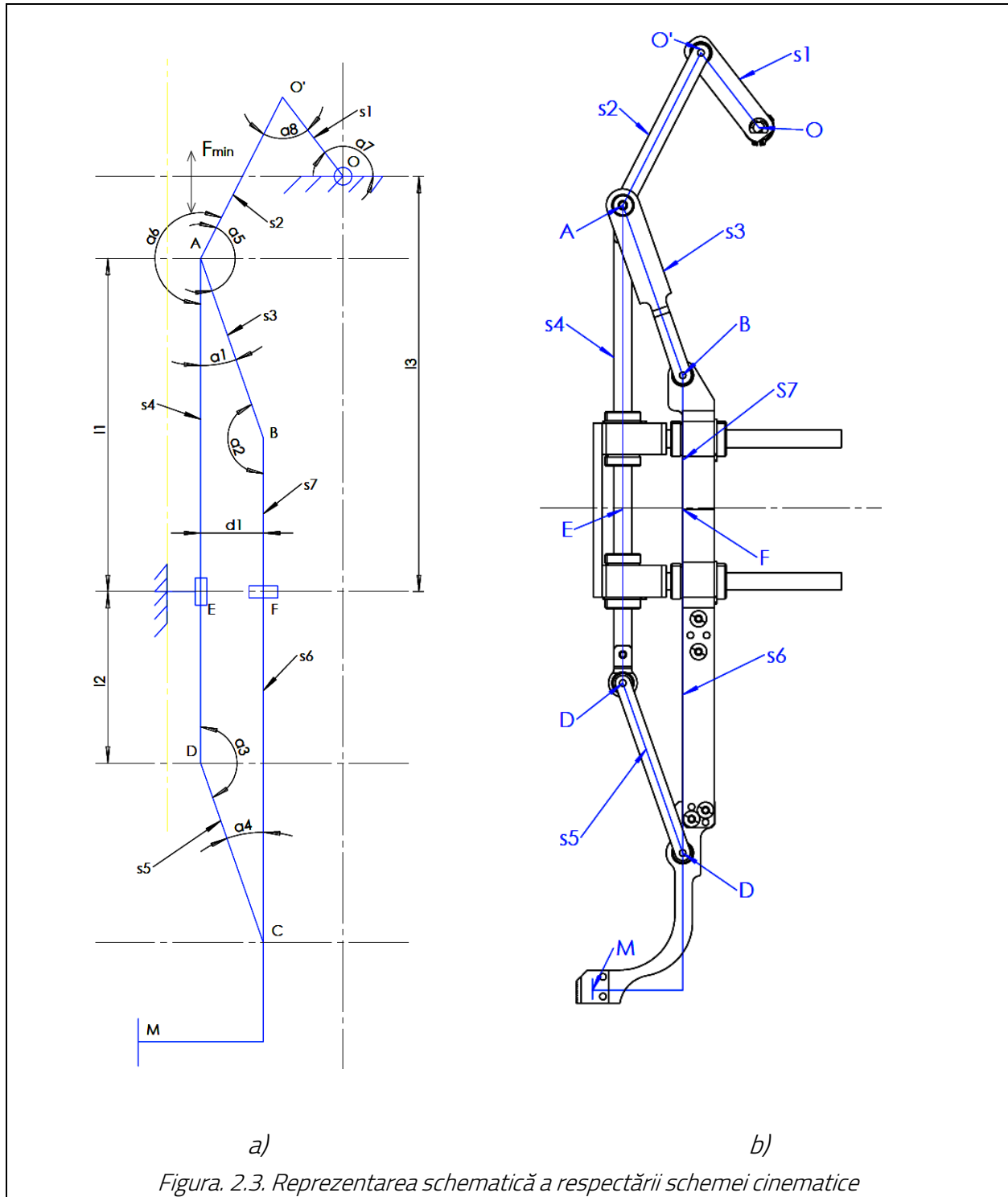
$$F_{\min} = G_{AD} + 2 \cdot G_{AB} + 0.04 \cdot m_{AB} + 0.08 \cdot m_{BC} + 0.588 \quad (2.24)$$

Pentru alegerea motorului, în funcție de F_{\min} se calculează momentul motor:

$$M_t = 9.55 \cdot 10^{-6} \frac{P}{n} \quad (2.25)$$

Unde, n = numărul de rotații, care se va ajusta în funcție de viteza de prehensare.

2.2. Modelarea 3D a modului proiectat



După parcurgerea etapelor modelării 3D și respectarea condițiilor cinematice s-a realizat modulul prehensor. În **Eroare! Fără sursă de referință.** este reprezentată respectarea schemei cinematice și realizarea mecanică, astfel încât cuplele cinematice să aibă gradele de libertate necesare. Cuplele de rotație (A), (B), (C), (D), (F) și (G) sunt de tip lagăr între piesele ce formează brațele pârghiilor și rulmenții radial-axiali, pentru a reduce frecările din mișcarea modului prehensor.

Mișcările de translație se realizează cu ajutorul ghidajelor liniare cu bile (E) și (H), care permit o continuitate în mișcarea modului prehensor foarte bună. Cu ajutorul rulmenților și ghidajelor se obține

un coeficient de frecare foarte mic, între cuple, ceea ce ajută în simularea 3D, deoarece aceasta este ideală și prin urmare frecările sunt neglijate [10].

2.3. Prototiparea virtuală a moduluiui

2.3.1. Importarea și simularea moduluiui prehensor în software-ul Adams

a. Importarea moduluiui prehensor în Adams

După finalizarea designului într-un program de proiectare precum Catia, piesele sunt importate în Adams sau, în funcție de versiunea Adams, întregul modul prehensor poate fi importat direct. Odată importat modulul prehensor, tipul de material este specificat pentru fiecare parte pentru a aplica constrângeri.

Cu ajutorul acestor instrumente, toate componentele moduluiui prehensor (Figura. 2.4) au fost constrânse pentru a permite mișcarea acestuia. Alături de aceste constrângeri, trebuie declarat care dintre cuplările constrânse este primară, iar apoi trebuie definite cele secundare [21], [22].

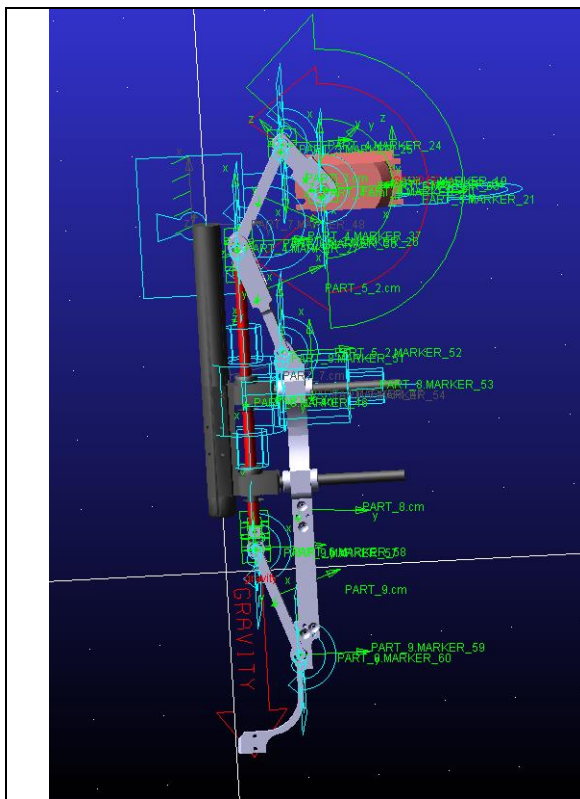


Figura. 2.4. Rețea de cupluri în Adams

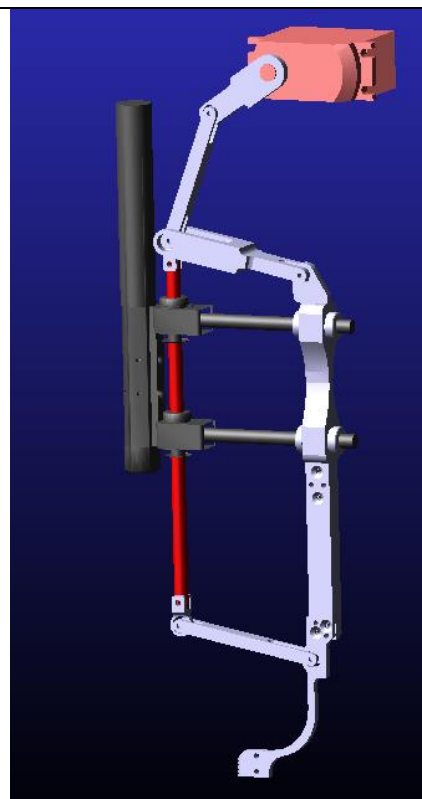


Figura. 2.5. Realizarea cinematicii

b. Realizarea prototipării virtuale și a simulării în Adams

După ce au fost puse toate cuplele, pe componentele moduluiui prehensor s-au aplicat forțele necesare mișcării, iar una dintre aceste forțe este constantă și anume forța gravitațională. Îndeplinind toate condițiile de funcționalitate se poate aplica simularea 3D a moduluiui prehensor.

După determinarea timpului și pașilor necesari pentru a genera mișcarea completă a moduluiui prehensor, se trece la etapa de start și modulul prehensor se va deplasa în poziția de avans față de origine, ca în Figura. 2.5 [23].

2.3.2. Analizarea mișcării și simularea grafică în programul Adams.

În urma simulării în programul Adams s-a aplicat un senzor de accelerație pentru întreg modulul. Această simulare a fost realizată aplicând forța motorului de antrenare a modulului prehensor de 2Nm, la care s-a adăugat accelerația gravitațională 9.8 m/s^2 .

În graficul din

Figura. 2.6 se observă maximele solicitărilor la un ciclu complet realizat de modul (avans-retras). Aceste eforturi se amplifică în timp deoarece apar uzurile mecanice în cuple și în rulmenți sau pot apărea jocuri mecanice, iar acestea pot crea vibrații în sistem. În simularea realizată nu sunt luate în calcul forțele de frecare, ceea ce înseamnă sistemul este considerat că realizează mișcări ideale [23].

Forțele de frecare care pot apărea în sistem și nu sunt luate în calcul sunt multiple și pot fi:

- Forțele de frecare în rulmenți,
- Forțele de frecare între componente,
- Forțele de frecare ale sistemului din cauza nerespectării dimensiunilor.

Datorită structurii mecanice de tip paralelogram antrenat printr-o mișcare de rotație, acesta are o ușoară accelerare la retragere și o ușoară decelerare la avans.

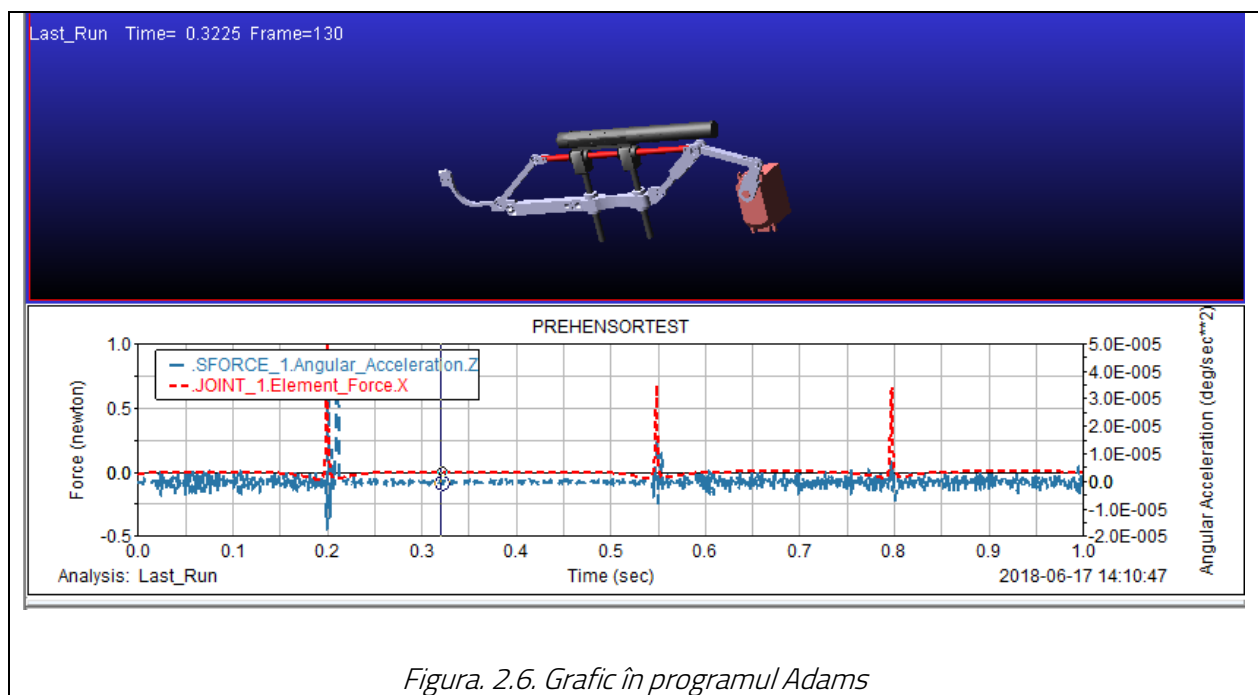


Figura. 2.6. Grafic în programul Adams

2.4. Analiza structurală a modulului și determinarea stării de tensiune a structurii

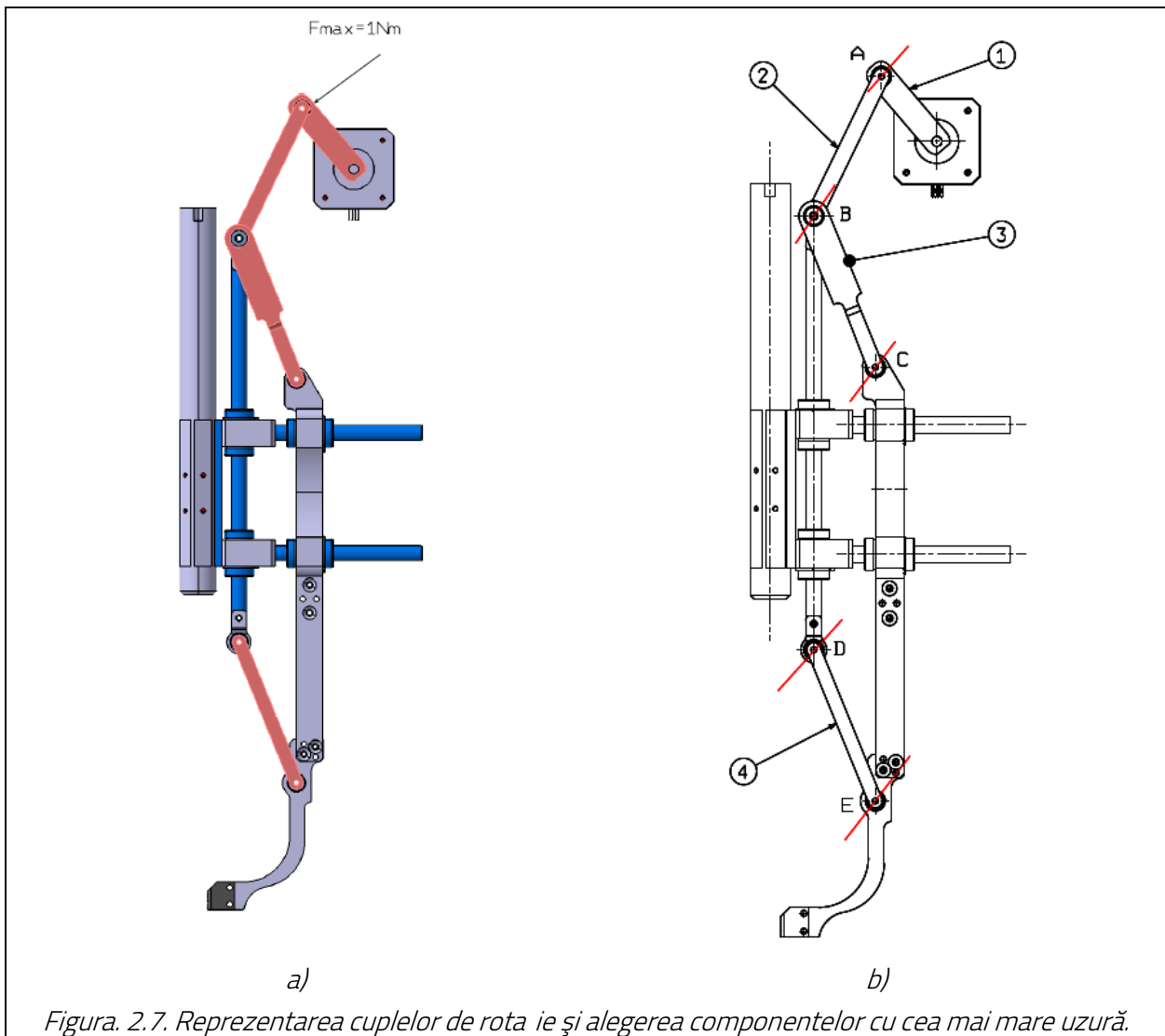
2.4.1. Selectarea și analiza componentelor mecanice ce sunt supuse uzurilor

Modulul prehensor este acționat de un motor electric de tip pas cu pas ce generează un cuplu de 8.2 Kg*cm, ceea ce înseamnă că exercită o forță asupra componentelor de 0.911 Nm.

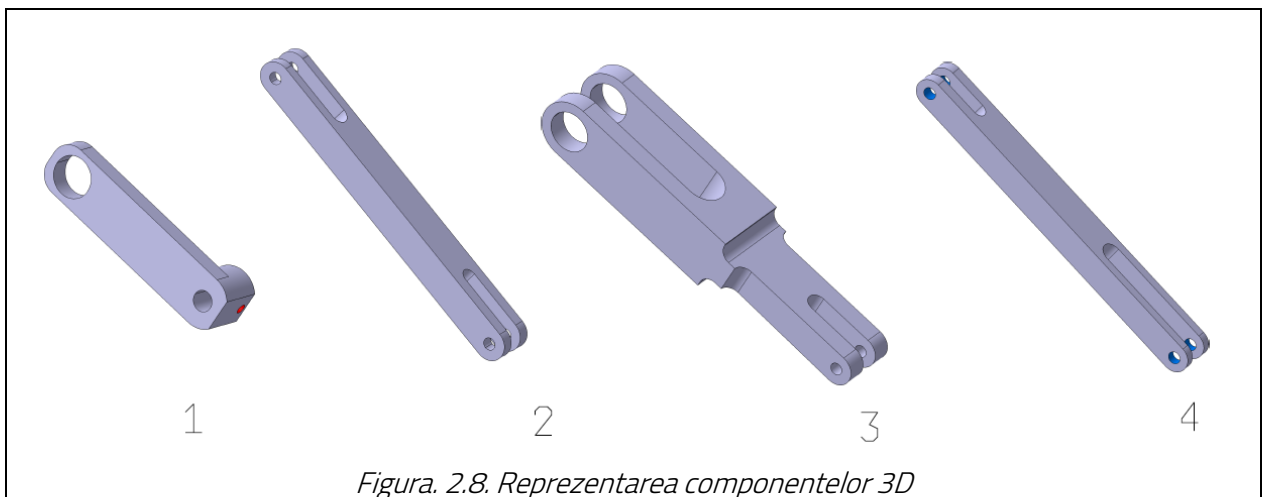
În Figura. 2.7 sunt reprezentate două imagini; prima imagine reprezintă vederea din fața unui modul prehensor adaptiv unde sunt reprezentate cu roșu componentele mecanice ce au o uzură mai mare în timp prin mișcarea lor de rotație. A doua imagine este o reprezentare 2D a modulului prehensor în care sunt reprezentate cuplele de rotație (o linie roșie în punctele A, B, C, D, E), unde se pot bloca mecanic componentele și numerotarea acestora. Componenta mecanică se blochează în cupla A, componenta

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

meanică 2 se blochează în cupla B, componenta mecanică 3 se blochează în cupla C, iar componenta mecanică 4 se blochează în cupla D, respectiv cupla E în funcție de mișcarea de avans sau de retragere.

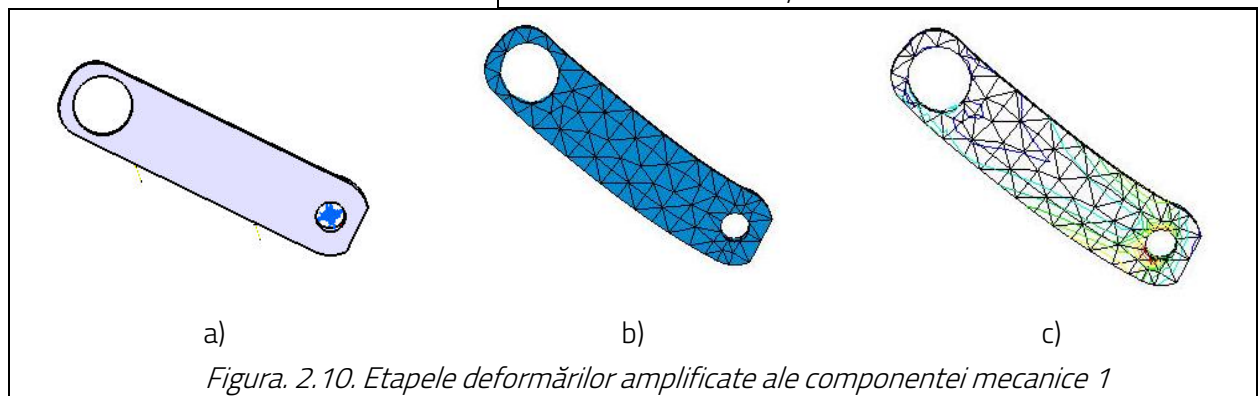
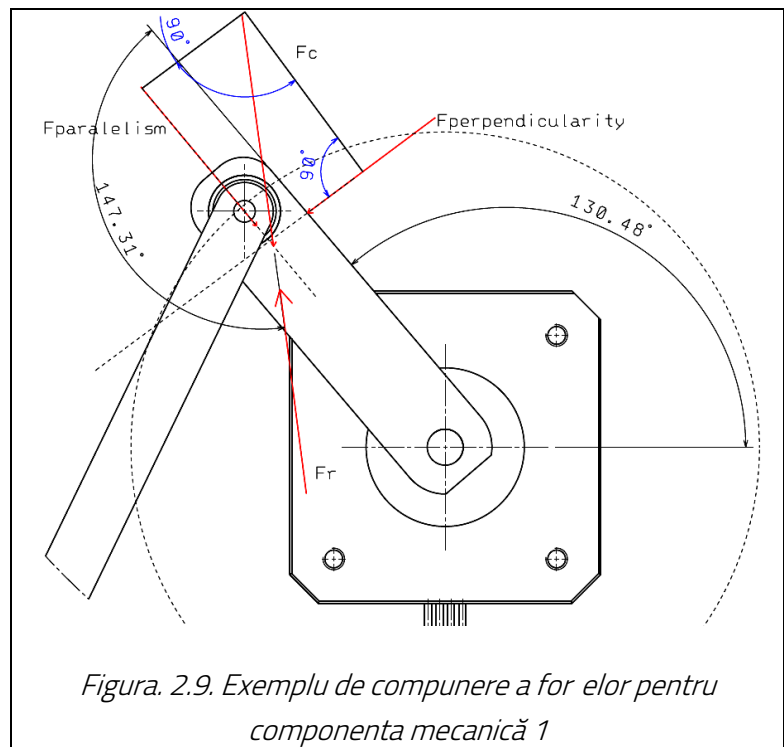


2.4.2. Aplicarea și descompunerea forțelor asupra componentelor mecanice ce realizează mișcări de rotație



Se elimină componentele 1, 2, 3 și 4 (Figura. 2.8) separat și se aplică forțele și constrângerile necesare pentru a simula blocarea în punctele A, B, C, D și E.

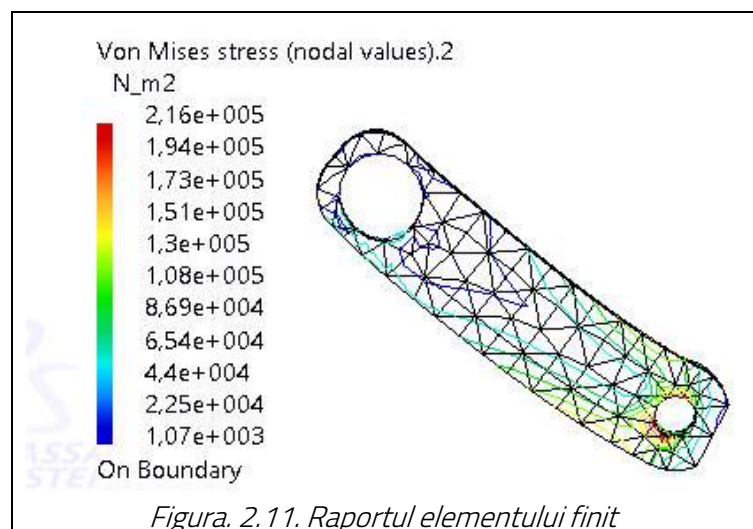
Fiecare componentă trebuie poziționată și forța aplicată trebuie să solicite în sensul generat de întregul modul, unde F_c este forța compusă dintre forța paralelă și forța perpendiculară pe componenta mecanică analizată. Forțele de aplicare sunt egale și de sens opus, în cazul nostru, Figura. 2.9, denumită cu F_r (forță de reacțiune).



Însumând vectorial forțele F_x , F_y , F_z , M_x , M_y și M_z se generează orientarea vectorială a forței de reacțiune F_r . Odată aplicate forțele, pe componenta mecanică se poate aplica metoda elementului finit, unde se poate observa deformarea plastică și elastică (Figura. 2.10), cu o amplificare de 10^7 .

a) Generarea parametrilor de tip stress ale componentei mecanice 1

În urma analizei elementului finit de tip stress a fost generat un raport automat din programul Catia, unde se poate observa zonele influențate și supuse unor deformări mici, dar și zonele unde nu există deformări. Raportul generat este sub forma unei coloane gradate de la roșu la albastru, unde roșul semnifică deformarea cea mai mare, iar albastru cea mai mică (Figura. 2.11) [3].



Pentru a genera poziția forței F_r la

unghiul de aproximativ 147° , trebuie ca din însumarea valorilor forțelor F_x , F_y , F_z , M_x , M_y și M_z să genereze poziția F_r (Tabelul 2.1).

Tabelul 2.1. Compunerea forțelor componentei mecanice 1

Forță	Valoarea forței	Unitate de măsură
F_x	$3 \cdot 817e-012$	N
F_y	-1	N
F_z	-1	N
M_x	$2 \cdot 900e-002$	N
M_y	$-2 \cdot 500e-003$	N
M_z	$2 \cdot 500e-003$	N

Respectând condițiile de la componenta mecanică 1 se generează forța de reacțiune F_r pentru celelalte componente mecanice 2, 3 și 4.

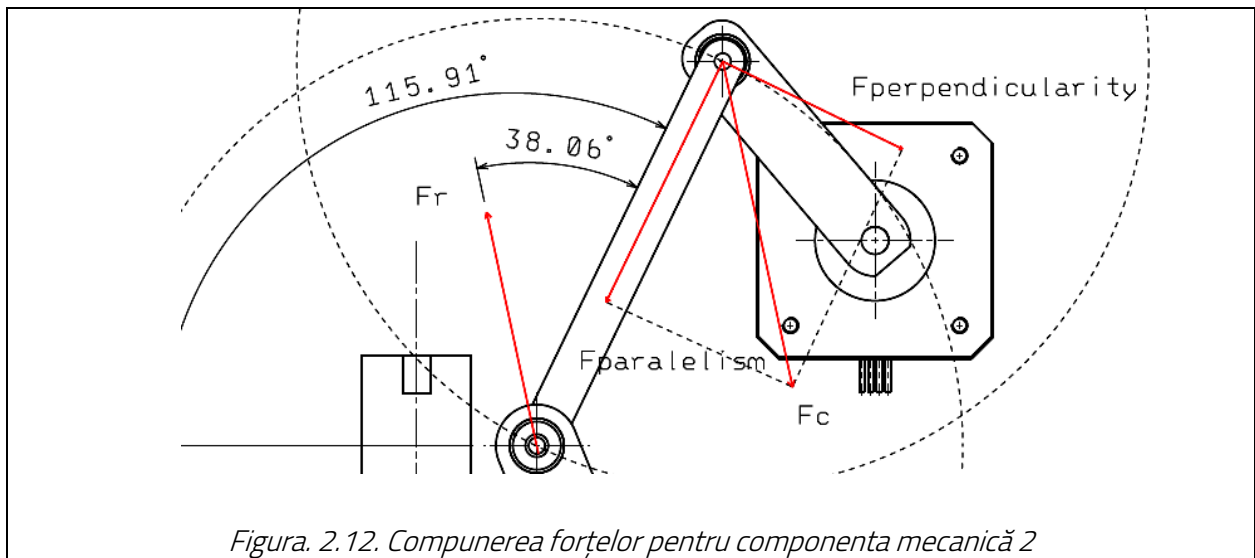


Figura. 2.12. Compunerea forțelor pentru componenta mecanică 2

2.4.3. Aplicarea și analiza forțelor asupra componentelor mecanice ce realizează o mișcare de translație orizontală

Mișcarea de translație este realizată cu ajutorul unor bucșe cu bile (ghidaje liniare). Cu ajutorul lor modulul prehensiv își realizează mișcările de translație cu ușurință, deoarece acestea preiau din frecările sistemului. În timp acest sistem ce realizează mișcarea cu ajutorul unor ghidaje se poate bloca sau pot apărea fenomene de înfrânare din cauza lubrifierii sau a impurităților acumulate între bile.

În momentul blocării ghidajelor liniare, forța exercitată asupra sistemului se distribuie în componentele mecanice. În Figura. 2.13 s-a realizat o schemă cu compunerea forțelor unde se aplică forța la o poziție aleasă de 30° , față de orizontală pentru a simula distribuția forței în sistemul de translație.

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

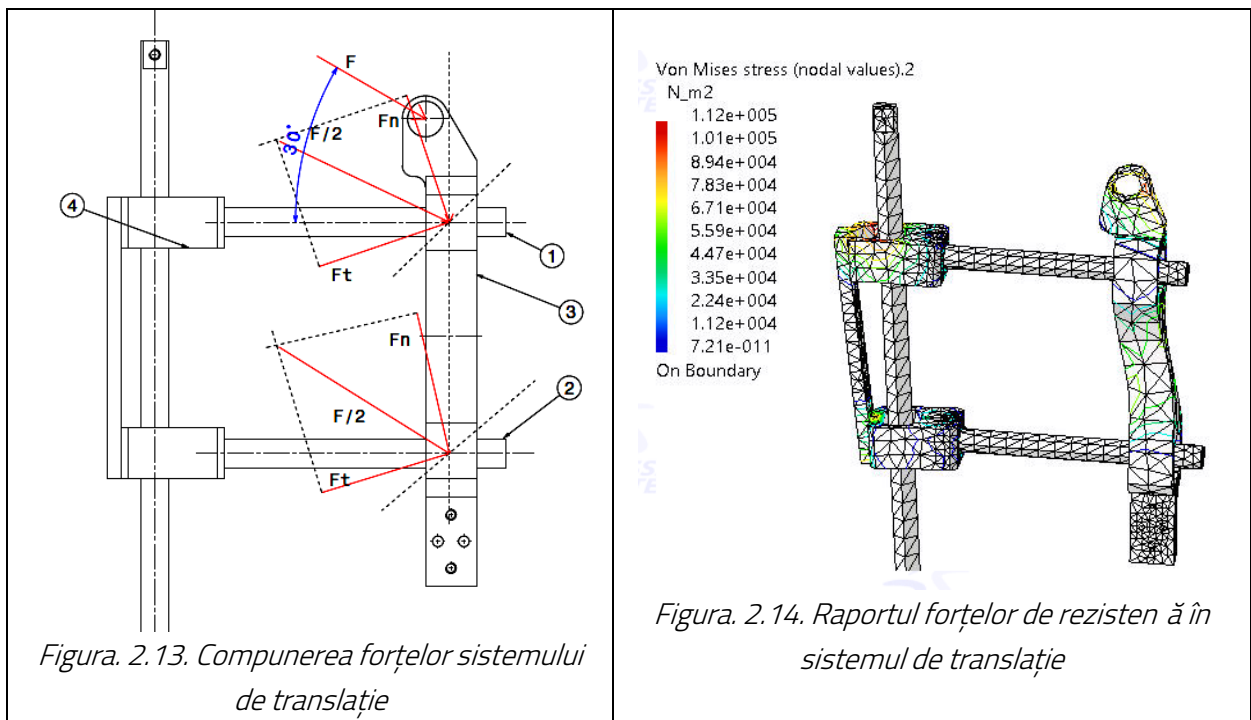


Figura. 2.13. Componerea forțelor sistemului de translație

Figura. 2.14. Raportul forțelor de rezistență în sistemul de translație

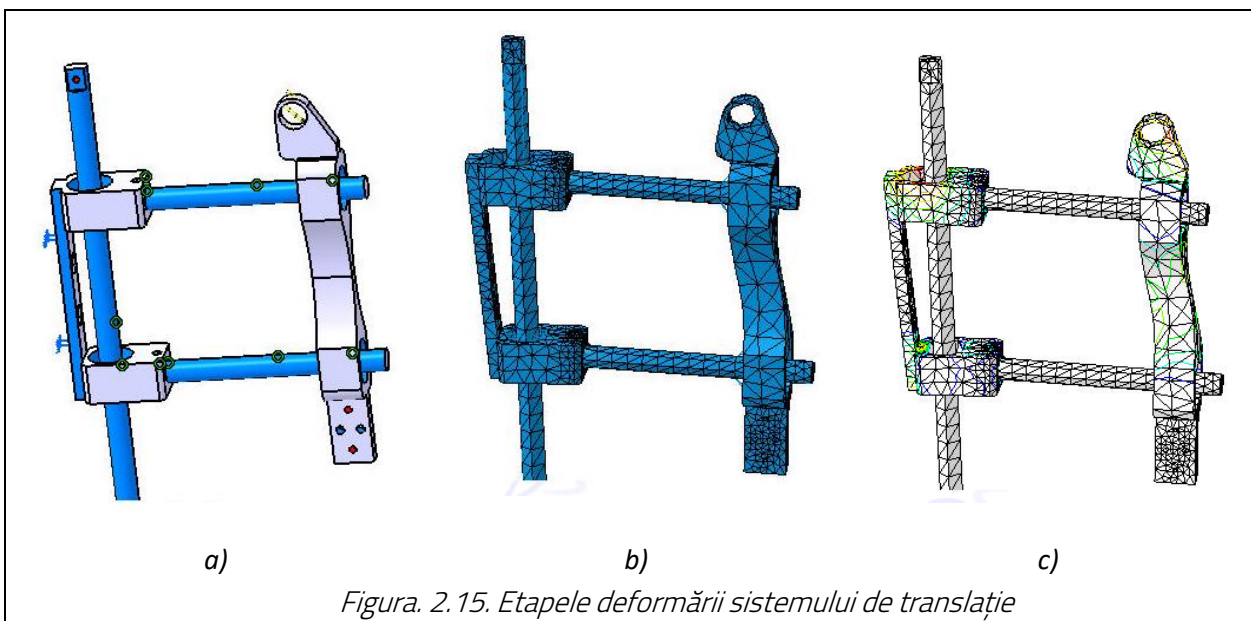


Figura. 2.15. Etapele deformării sistemului de translație

Forța (F) este aplicată asupra componentei mecanice (3) care realizează o mișcare de translație față de componentele mecanice (1), (2). În momentul blocării, forța se distribuie în mod egal în cele două tije, iar ele la rândul lor transmit forța asupra componentei 4 unde sunt încastrate.

După momentul blocării, forța (F) tinde să se orienteze către direcția forței normale (F_n) deoarece componenta (3) este blocată și nu mai realizează nicio mișcare. După ce forța distribuită ajunge să capete direcția forței normale sistemul tinde să se deformeze în jos (Figura. 2.15).

Pentru a afla valorile rezistenței forțelor F_x , F_y , F_z , M_x , M_y și M_z s-a aplicat metoda elementului finit asupra sistemului, în urma căruia s-a generat un raport de forțe (Figura. 2.14) și care sunt completate în Tabelul 2.2.

Tabelul 2.2. Valoarea rezistenței forțelor generate asupra sistemului

For a	Valoarea forței	Unitate de măsură
-------	-----------------	-------------------

Fx	-1* 037e-012	N
Fy	-2	N
Fz	-2	N
Mx	-6* 946e-002	N
My	4* 747e-011	N
Mz	-1* 533e-010	N

2.5. Concluzii

Proiectarea prehensorului autoadaptiv cu cinci degete independente demonstrează o flexibilitate și adaptabilitate ridicată în prinderea obiectelor cu forme și dimensiuni variate. Datorită mișcării plan-paralele și controlului individual al fiecărui braț, acest sistem este capabil să manipuleze obiecte cu forme neregulate și să aplice forța de prehensiune necesară fără a le deteriora sau a le scapa.

Implementarea unei configurații cinematice de tip paralelogram asigură precizia și planeitatea mișcărilor prehensorului în raport cu obiectul manipulat și suprafața de lucru. Acest design este esențial pentru a obține o deplasare precisă și controlată, în special în contextul prinderii obiectelor mici, unde erorile de mișcare ar putea compromite eficiența și acuratețea operațiunii.

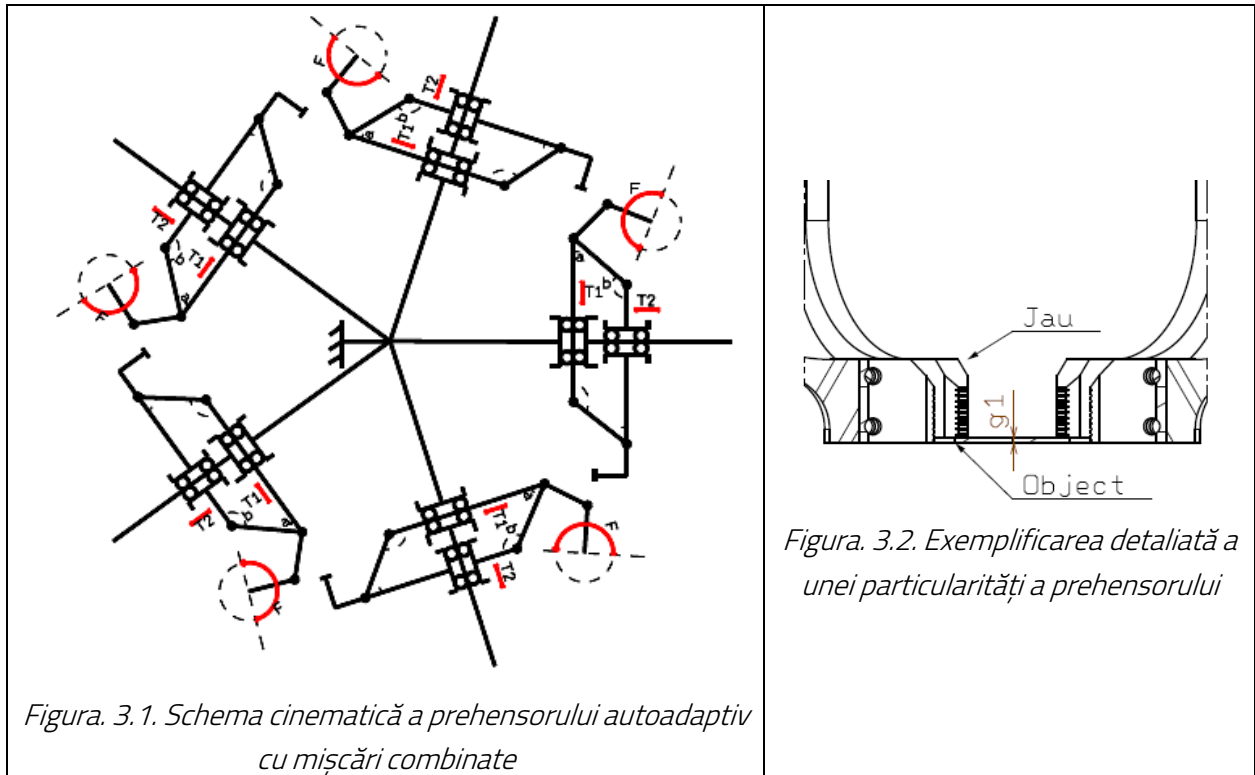
Proiectarea modulului prehensor a inclus etape detaliate de modelare 3D, simulare cinematică și analiză structurală pentru a evalua performanțele și rezistența componentelor. Utilizarea software-urilor de proiectare și simulare precum CATIA și Adams a permis o evaluare profundă a comportamentului mecanic al prehensorului, identificând zonele de uzură și optimizând design-ul pentru a minimiza frecările și a asigura durabilitatea pe termen lung.

3. PROIECTAREA PREHENSORULUI AUTO-ADAPTIV

Obiectivul propus în acest capitol a fost proiectarea și implementarea unui prehensor autoadaptiv, detaliind structura cinematică, adaptabilitatea la diferite forme și greutateți ale obiectelor, aspectele electrice și software, precum și studiul vibrațiilor în sistemul prehensurului.

3.1. Proiectarea 3D a prehensurului autoadaptiv

Structura cinematică a prehensurului autoadaptiv din Figura. 3.1 este formată din mai multe degete de prehensiune ce sunt sunt fixate pe același ax.



Structura cinematică a prehensurului autoadaptiv demonstrează independența mecanică a fiecărui modul în parte. Prin dispunerea elementelor de prehensiune circular, acesta acoperă toate zonele de contact ale obiectului, nepermițându-i acestuia să se miște [24].

Schema cinematică reprezentată în Figura. 3.1 demonstrează particularitățile mecanice ale unui sistem de prehensiune. Acest prehensur este construit cu elemente de contact ce îndeplinesc funcția de bacuri (Figura. 3.2), care avantajează particularitatea acestuia.

Modulele prehensurului sunt fixate de tija (1), fixată în placa inferioară (16), prin intermediul unei asamblări fără joc, cu pană cilindrică (18) și șurub de strângere cu cap înecat (17), fixate din interiorul incintei elementelor de acționare (2).

În urma implementării modulelor prehensurului s-a obținut prehensurul din Figura. 3.3, unde plăcile marcate sunt plăcile de susținere ale tije centrale și a modulelor.

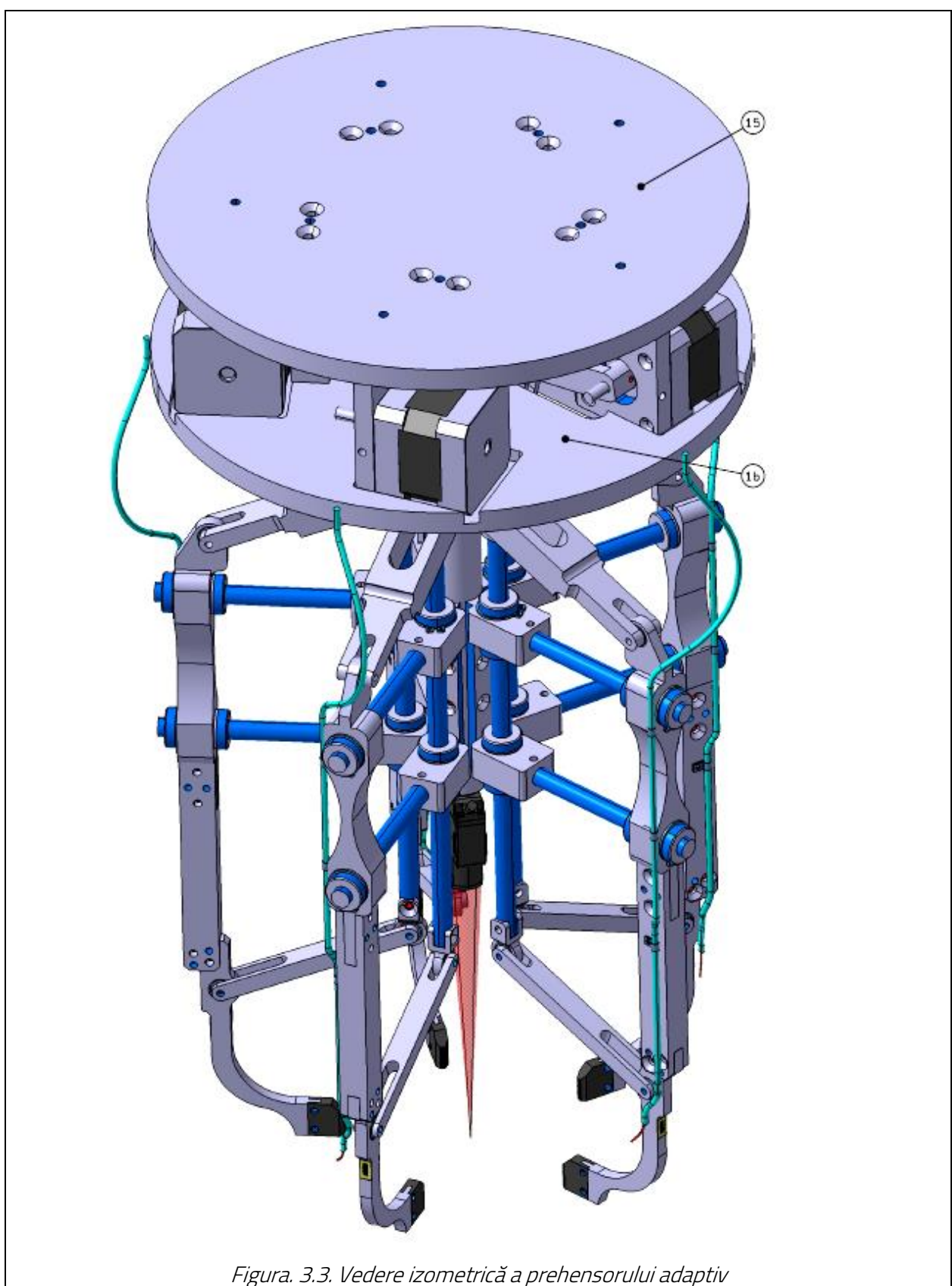


Figura. 3.3. Vedere izometrică a preensorului adaptiv

Componentele sau zonele marcate cu albastru sunt zone tolerate pentru asigurarea mișcărilor.

3.2. Studiul adaptivității sistemului de prehensiune

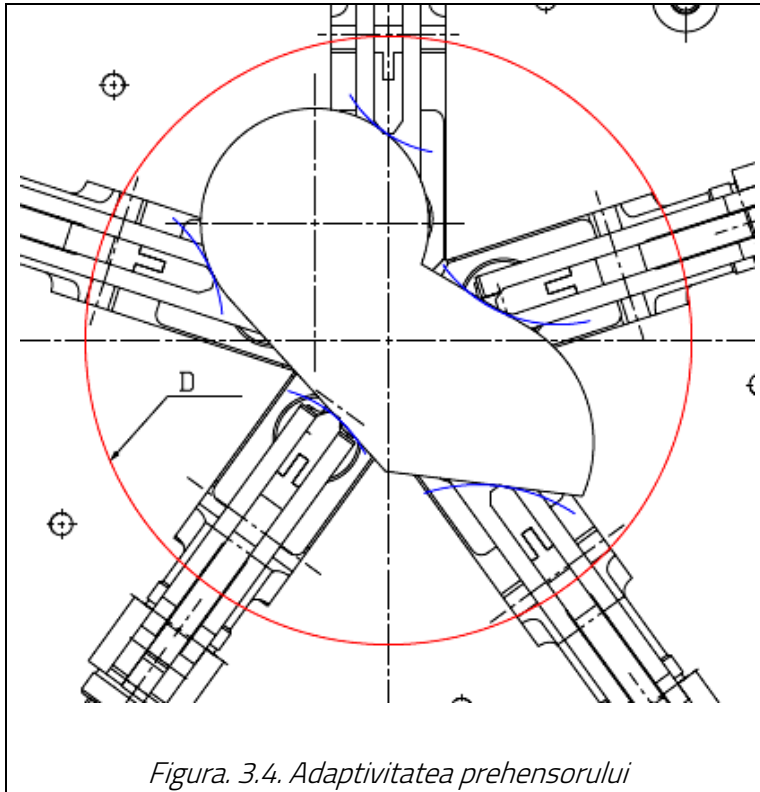


Figura. 3.4. Adaptivitatea prehensorului

mare a prehensorului să fie rezultată de aceasta.

Prehensorul autoadaptiv poate realiza prehensiune eficientă cu cât are mai multe brațe sau degete. Prin creșterea punctelor sau zonelor de contact cu obiectul, șansele ca acesta să nu alunece sau să fie scăpat din bacuri este mai mică. Zonele de contact și unghiurile sub care acestea cad față de suprafața obiectului sunt exemplificate cu un arc de cerc albastru, conform Figura. 3.4, unde se pot diferenția unghiurile de incidență între bacurile prehensorului și obiect.

În urma contactelor dintre bacuri și obiect se pot obține diferite figuri geometrice prin care putem deduce forma obiectului preluat, după cum este demonstrat în Figura. 3.5.

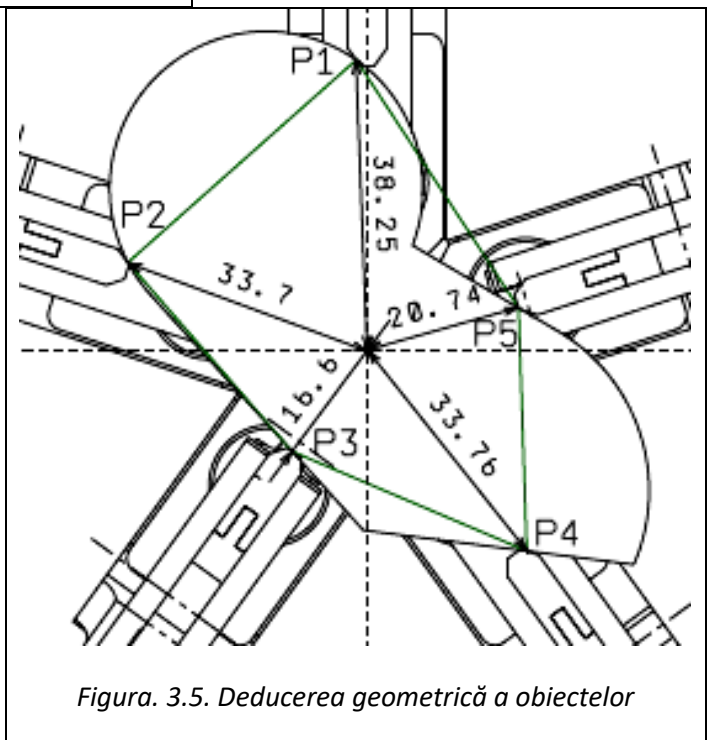


Figura. 3.5. Deducerea geometrică a obiectelor

Prin contactul unghiular al bacurilor cu obiectul preluat acesta poate genera momente de mișcare a obiectului în diferite direcții. La prima vedere acest lucru poate părea un dezavantaj, însă sistemul se poate deplasa în orice direcție și poate compensa și diferența unghiulară generată în timpul prehensiunii.

Acest prehensor este autoadaptiv datorită particularităților lui din punct de vedere mecanic, electric și software. Cele trei caracteristici descriu perfect un sistem mecatronic care lucrează simultan pentru fiecare brățîn parte.

Fiecare modul prehensor își realizează propriile sarcini și generează la rândul lor informații legate de starea în care se află.

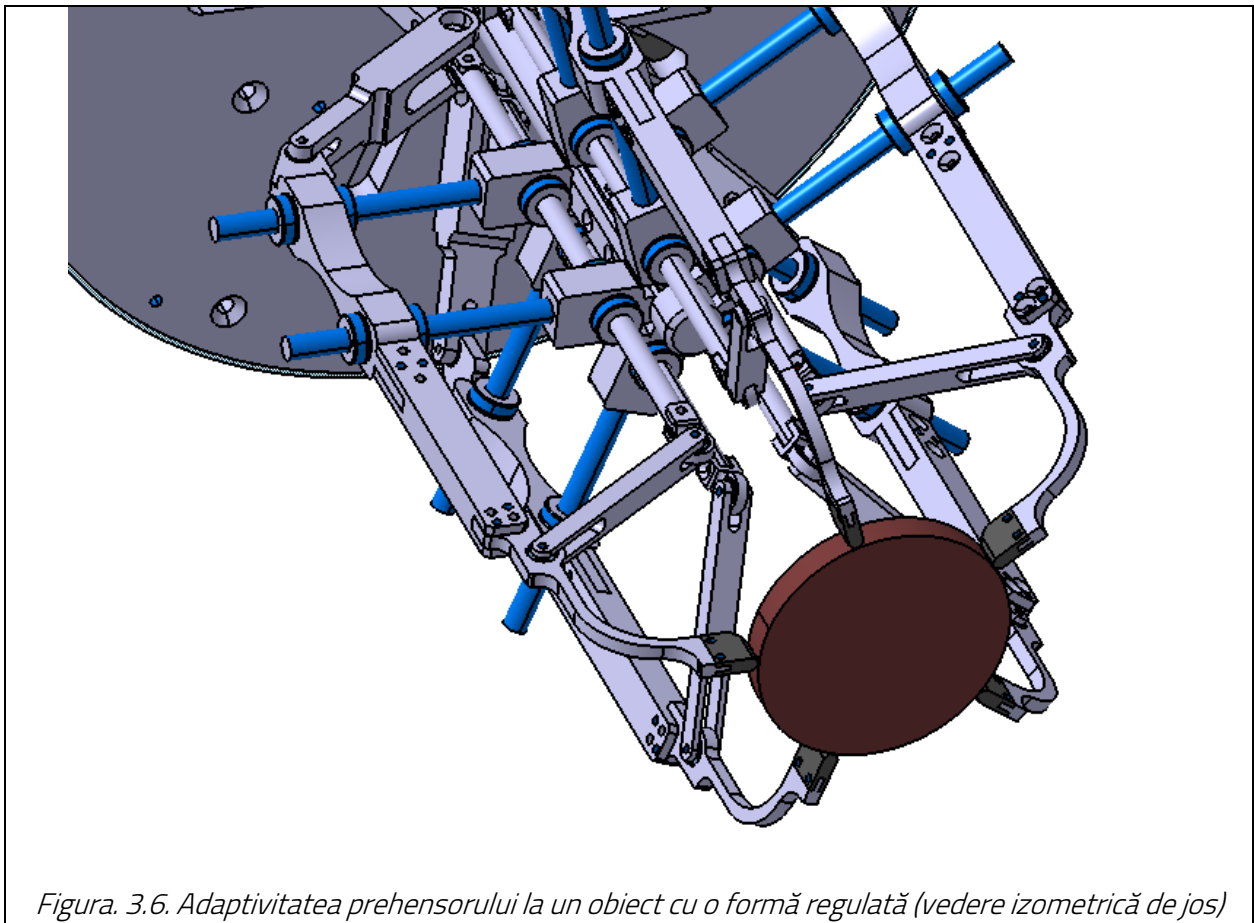


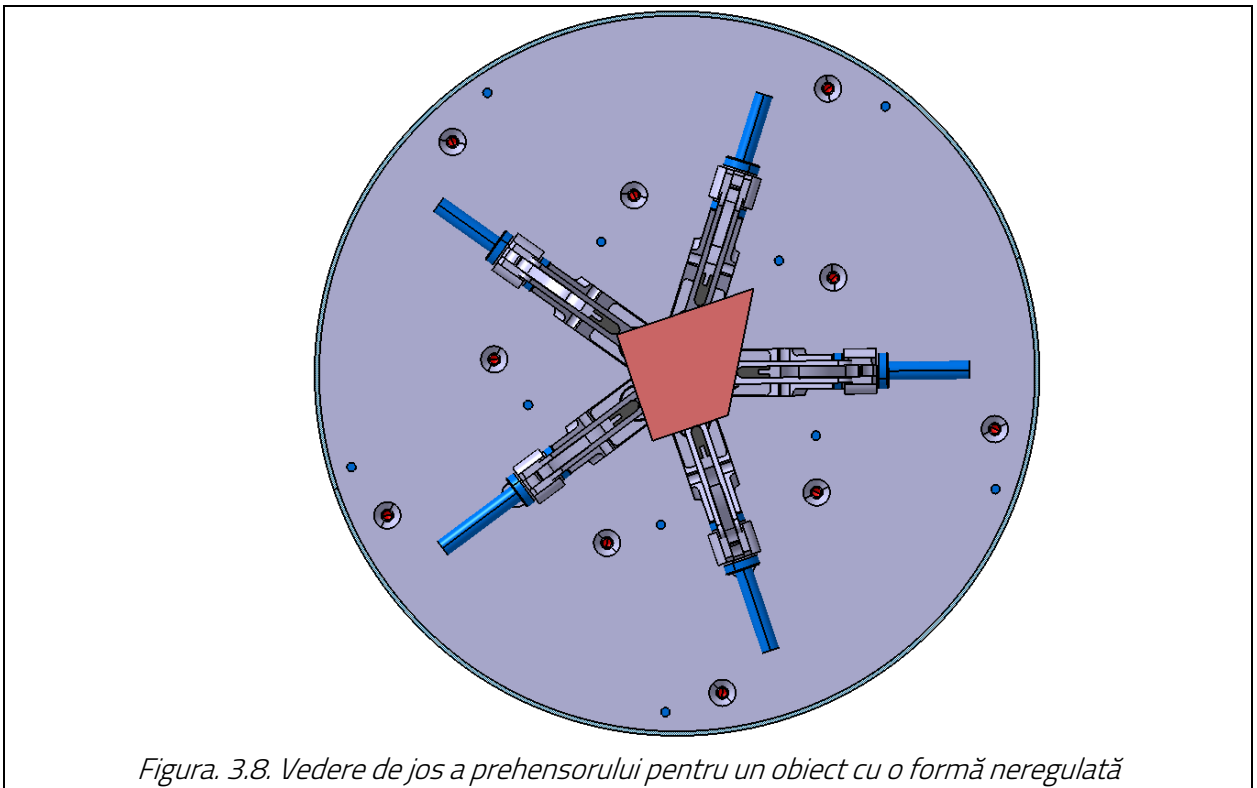
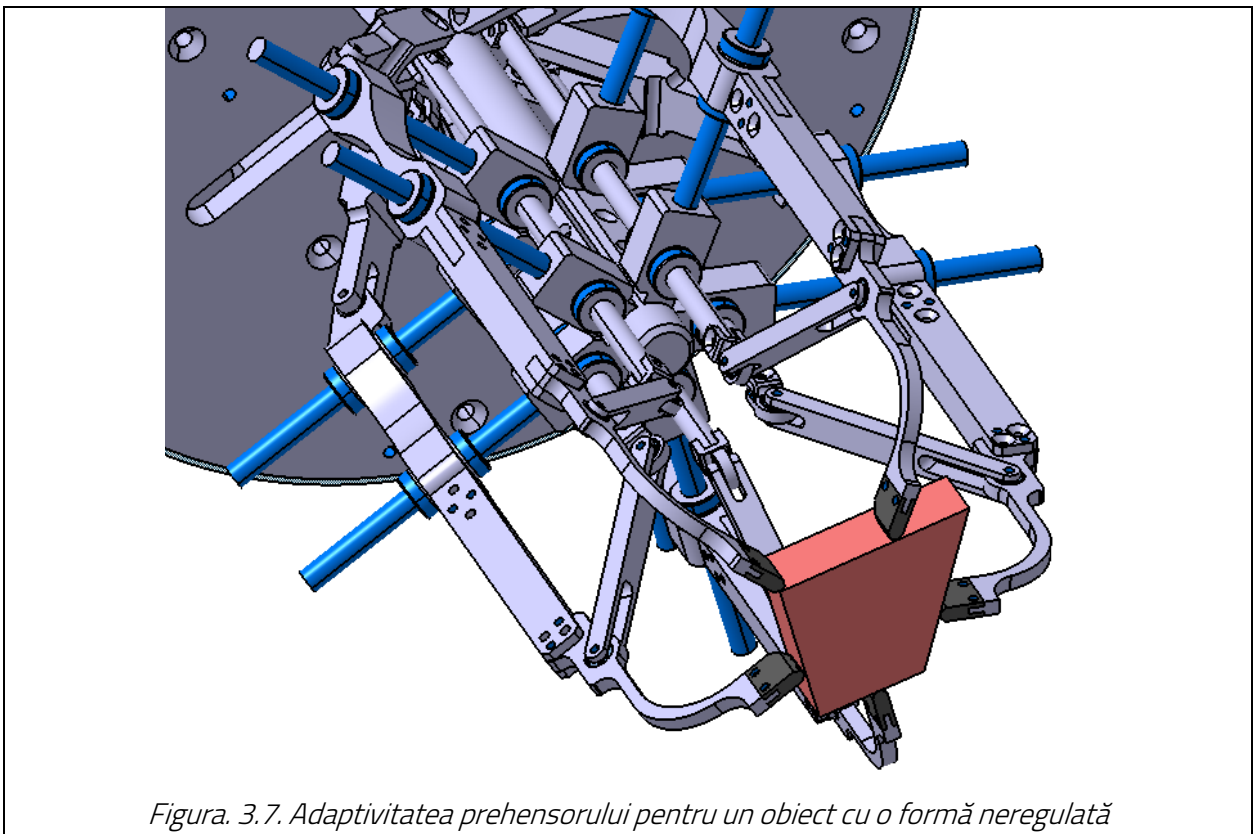
Figura. 3.6. Adaptivitatea prehensorului la un obiect cu o formă regulată (vedere izometrică de jos)

Majoritatea prehensoarelor au capacitatea de a prehensa obiecte regulate, așa cum se observă în Figura. 3.6. Obiectul este prins uniform de către toate degetele, în aceeași poziție.

Când bacurile au atins obiectul, sistemul de acționare rămâne blocat în poziția actuală. Pentru a verifica adaptivitatea, prehensorul a fost implementat în modulul Kinematics Simulation din programul Catia. Piesa a fost declarată fixă, iar stările celorlalte piese au fost stabilite în funcție de aceasta. De asemenea, au fost definite tipul cuplelor și sensul mișcărilor acestora.

Într-un modul prehensor există o singură cuplă activă care generează mișcarea întregului sistem, în timp ce restul cuplelor sunt pasive și sunt influențate de prima cuplă cinematică [14].

Pentru a demonstra adaptivitatea s-au realizat simulări și pe obiecte cu o formă neregulată, unde se observă mișcările independente ale fiecărui modul prehensor (Figura. 3.7 și Figura. 3.8).



În urma simulării în Kinematics se observă diferențele unghiulare ale fiecărui modul prehensor în timpul prehensiunii. Valorile unghiulare diferite demonstrează că forma obiectului este neregulată (**Eroare! Fără sursă de referință.**).

Pentru a verifica adaptivitatea prehensorului s-a realizat o simulare pe un obiect cu o formă greu de preluat (Figura. 3.9 și Eroare! Fără sursă de referință.).

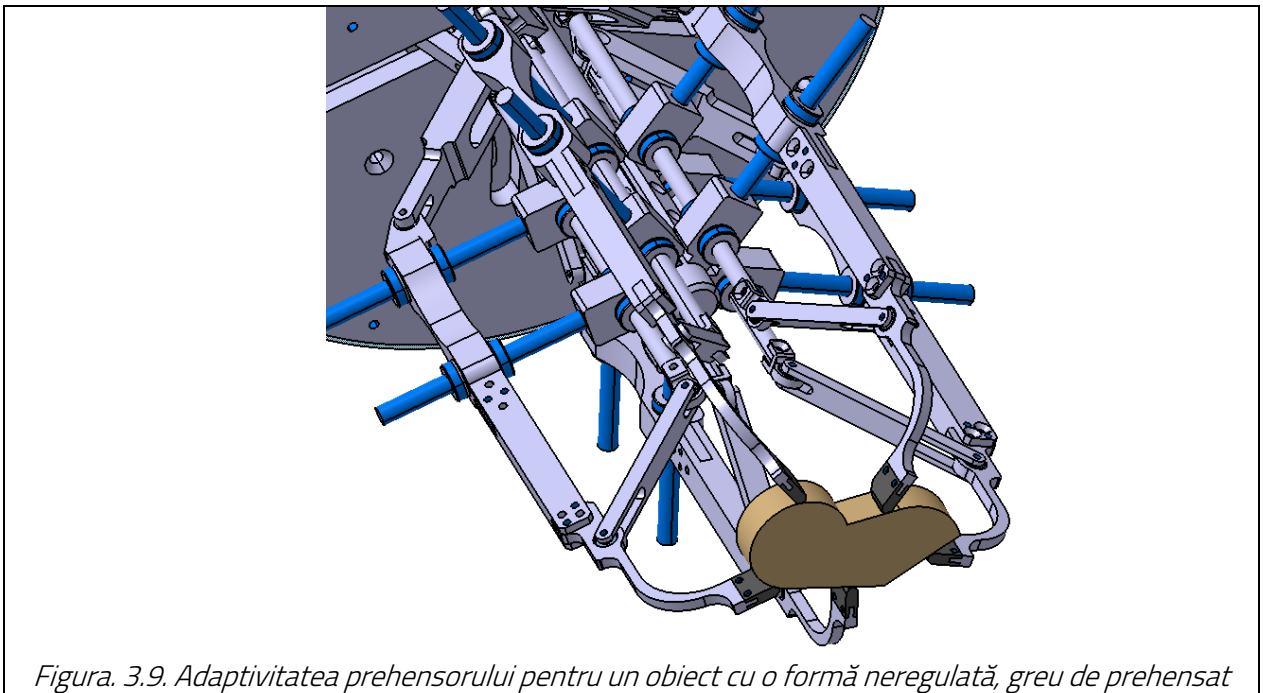


Figura. 3.9. Adaptivitatea prehensorului pentru un obiect cu o formă neregulată, greu de preluat

În urma simulării în Kinematics se observă diferențele unghiulare ale fiecărui modul prehensor în timpul preluării. Valorile unghiulare diferite demonstrează că forma obiectului este neregulată (**Eroare! Fără sursă de referință.**).

3.3. Realizarea constructivă a prehensorului

În urma montării modulelor s-au descoperit mai multe probleme de nerespectare a cotelor sau a toleranțelor. Nerespectarea condițiilor impuse pe desene a dus la griparea modulelor prehensorului în zonele de translație. Prehensorul realizat fizic este reprezentat în Figura. 3.10.

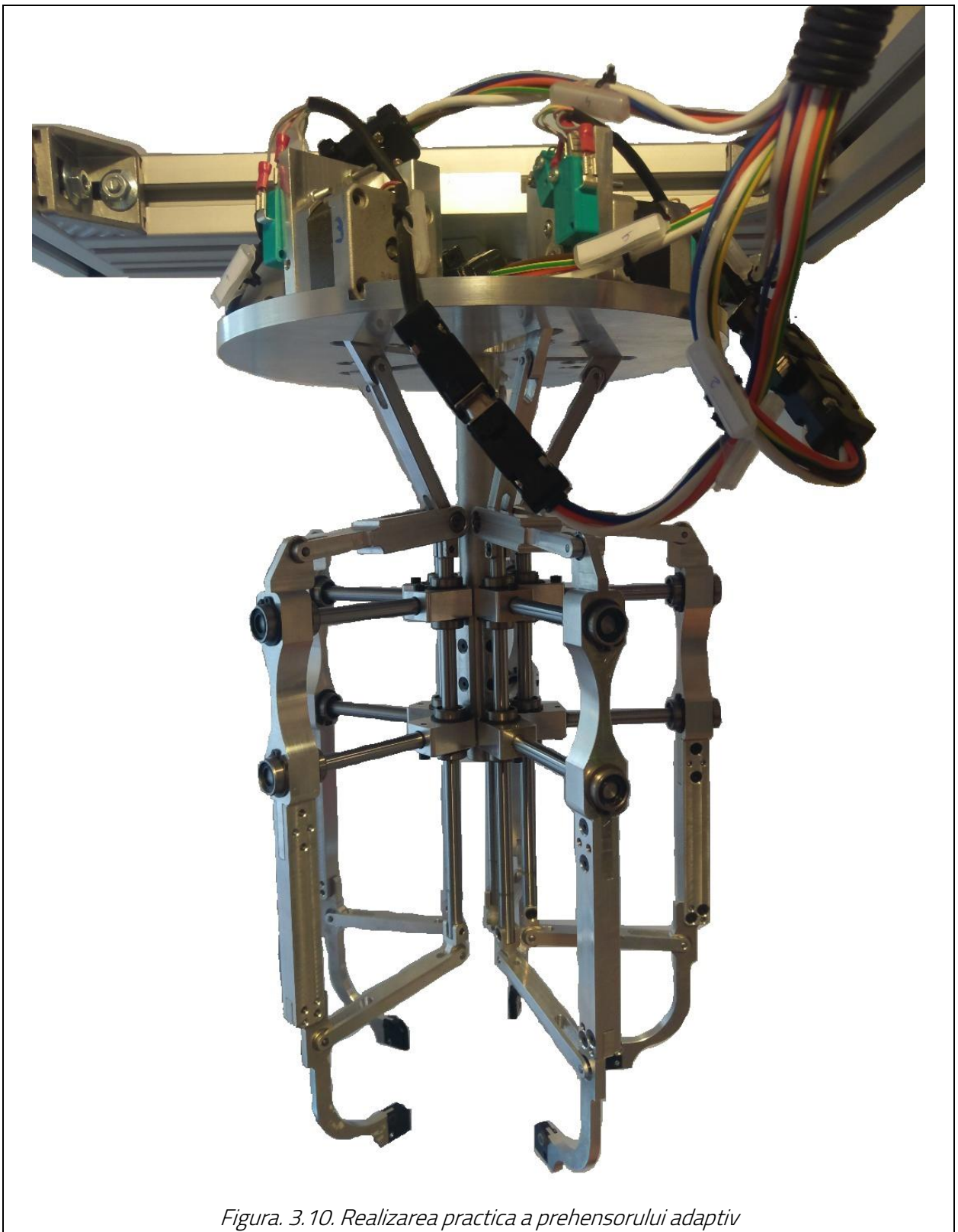


Figura. 3.10. Realizarea practica a prehensorului adaptiv

3.4. Realizarea și implementarea software în vederea testării modulelor

#include <Stepper.h> - funcție pentru declararea motoarelor.

const int stepsPerRevolution = 150;

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

```
1 include <Stepper.h>
2 const int stepsPerRevolution = 150;
3 Stepper myStepper1(stepsPerRevolution, 22, 24, 26, 28);
4 Stepper myStepper2(stepsPerRevolution, 30, 32, 34, 36);
5 Stepper myStepper3(stepsPerRevolution, 38, 40, 42, 44);
6 Stepper myStepper4(stepsPerRevolution, 46, 48, 50, 52);
7 Stepper myStepper5(stepsPerRevolution, 23, 25, 27, 29);
```

Figura. 3.11. Lista 1: Declaraarea porturilor PWM de control a driverelor de tipul L298N

```
9 int state = 0;
10 const int buttonPin1 = 2;
11 const int buttonPin2 = 3;
12 int buttonState1 = 0;
13 int buttonState2 = 0;
14
15 const int buttonPin19 = 19;
16 const int buttonPin18 = 18;
17 int buttonState19 = 0;
18 int buttonState18 = 0;
19
20 const int buttonPin17 = 17;
21 const int buttonPin16 = 16;
22 int buttonState17 = 0;
23 int buttonState16 = 0;
24
25 const int buttonPin15 = 15;
26 const int buttonPin14 = 14;
27 int buttonState15 = 0;
28 int buttonState14 = 0;
29
30 const int buttonPin21 = 21;
31 const int buttonPin20 = 20;
32 int buttonState21 = 0;
33 int buttonState20 = 0;
34
35 void setup()
36 {
37   Serial.begin(9400);
38   pinMode(buttonPin1, INPUT);
39   pinMode(buttonPin2, INPUT);
40
41   pinMode(buttonPin19, INPUT);
42   pinMode(buttonPin18, INPUT);
43
44   pinMode(buttonPin17, INPUT);
45   pinMode(buttonPin16, INPUT);
46
47   pinMode(buttonPin15, INPUT);
48   pinMode(buttonPin14, INPUT);
49
50   pinMode(buttonPin21, INPUT);
51   pinMode(buttonPin20, INPUT);
```

Figura. 3.12. Lista 2: Declaraarea senzorilor de limitarea cursei pentru fiecare modul

```

56   if (Serial.available() > 0)
57   { // Checks whether data is coming from the serial port
58     state = Serial.read(); // Reads the data from the serial port [21]
59   }
60   buttonState1 = digitalRead(buttonPin1);
61   buttonState2 = digitalRead(buttonPin2);
62
63   buttonState19 = digitalRead(buttonPin19);
64   buttonState18 = digitalRead(buttonPin18);
65
66   buttonState17 = digitalRead(buttonPin17);
67   buttonState16 = digitalRead(buttonPin16);
68
69   buttonState15 = digitalRead(buttonPin15);
70   buttonState14 = digitalRead(buttonPin14);
71
72   buttonState21 = digitalRead(buttonPin21);
73   buttonState20 = digitalRead(buttonPin20);
74
75   if ((state == 'j') && (buttonState1 == HIGH) && (buttonState2 == LOW))
76   {
77     myStepper1.setSpeed(300);
78     myStepper1.step(-850);
79     Serial.println("Brat 5 retras ");
80   }
81
82   if ((state == 'i') && (buttonState1 == LOW) && (buttonState2 == HIGH))
83   {
84     myStepper1.setSpeed(300);
85     myStepper1.step(850);
86     Serial.println("Brat 5 avans");
87   }
88
89
90   if ((state == 'c') && (buttonState19 == LOW) && (buttonState18 == HIGH))
91   {
92     myStepper2.setSpeed(300);
93     myStepper2.step(-850);
94     Serial.println("Brat 2 retras ");
95   }

```

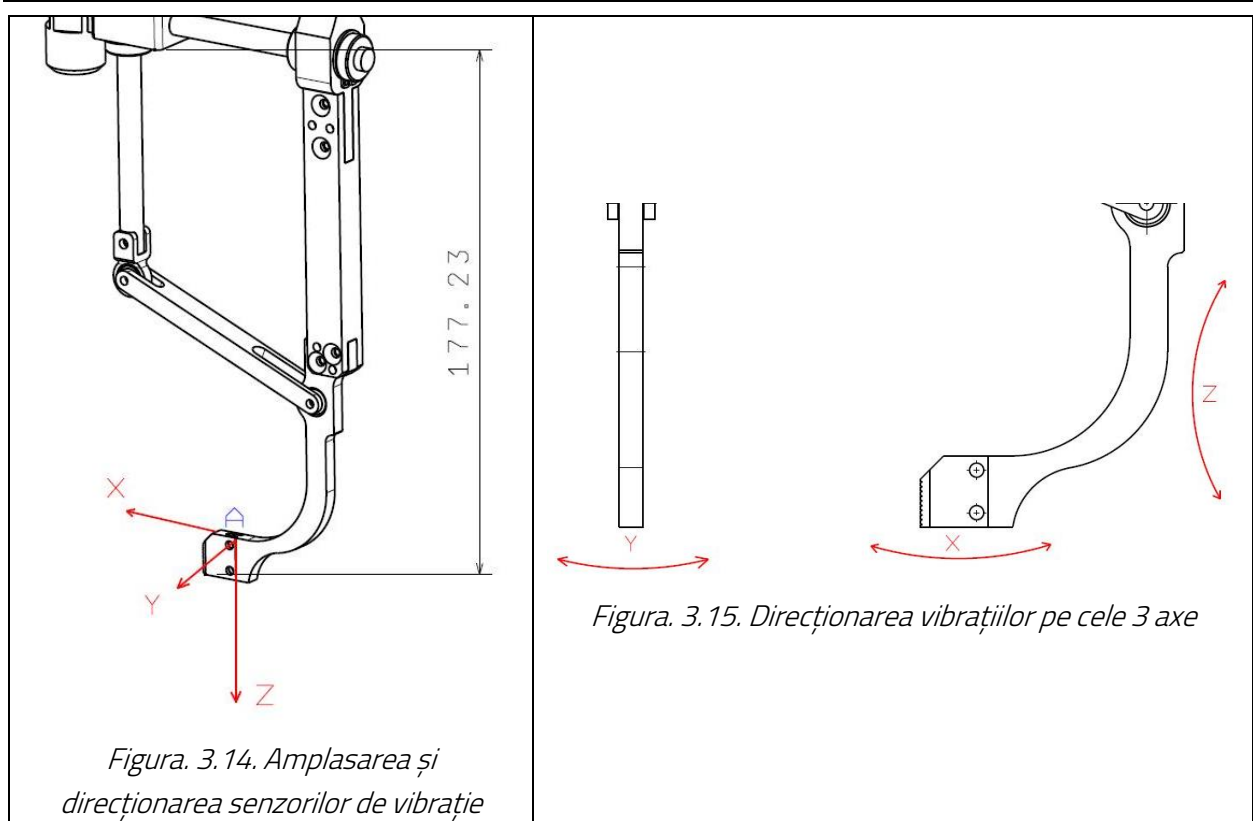
Figura. 3.13. Lista 3: Declararea comenzilor pentru fiecare modul în parte, fiecare motor pas cu pas este condiționat de limitatorii de cursă și de comanda de acționare

3.5. Studiul vibrațiilor modulelor antrenate coaxial

Procesul de prehensiune este determinat prin gradul de alunecare a obiectului preluat. Un efect considerabil ce poate influența gradul de alunecare este generat de vibrațiile din sistemul de prehensiune [25].

Vibrația este generată de elementele în mișcare în timpul prehensiunii. Amplitudinea vibrațiilor este amplificată de numărul de componente mobile aflate în mișcare în același timp [26].

Conform schemei cinematice din Figura. 3.14, motorul este poziționat în punctul A, iar pentru acest tip de antrenare coaxială, modulul prehensorului generează vibrații în timpul mișcării și prin pasul motorului pas cu pas care este de 1,6°.



Pentru determinarea vibrațiilor unui modul prehensor s-au amplasat senzori de vibrație de tipul SW-18010P pe direcțiile x, y, z (Figura. 3.14). Acest tip de senzor poate fi utilizat în diverse aplicații în care vibrațiile influențează funcționalitatea.

Cele două contacte ale senzorului nu sunt conectate în stare de repaus. Când forța externă acționează fie asupra mișcării modului prehensor, fie asupra vibrației generate de orice alt generator extern, cei doi pini de contact ai senzorului sunt închiși și se deschid. Când forța este înlăturată, terminalele senzorului revin la contactele deschise [27], [28].

În Figura. 3.15 este exemplificată orientarea vibrațiilor unui modul prehensor. Senzorul de vibrație este amplasat în punctul cel mai îndepărtat față de un punct fix, acesta fiind la 177 mm distanță. Pentru fiecare orientare a senzorului este exemplificată ce direcție a vibrației se măsoară x, y, z.

3.5.1. Vibrațiile obținute în timpul mișcării modulelor

Tabelul 3.1. Valori obținute la măsurarea mișcării modului

Modul 1 [Hz]		
x	y	z
0	0	97
0	0	0
5503	0	478
7156	214456	549
139435	97289	259
68474	13610	7167
25117	1350	269
1445	3309	52226

Pentru determinarea cât mai corectă a vibrațiilor unui modul prehensor a fost necesară măsurarea fiecărui modul în parte. Prin testarea particulară a modului au fost eliminate zgomotele ce pot influența măsurătorile [29], [30].

În Tabelul 3.1 sunt reprezentate o parte din valorile de intrare determinate de senzorii de vibrație în timpul a mai multor deplasări de avans și retragere. Simularea aceasta a fost realizată în mișcare liberă a brațelor prehensorului fără ca acesta să întâmpine un obstacol [31], [32].

În tabel sunt marcate câteva valori maxime ce au fost detectate de senzori în timpul deplasării.

3.5.2. Reprezentarea grafică și interpretarea datelor

Conform datelor de intrare de la senzorii de vibrație pentru toate modulele, s-a realizat câte un grafic pentru fiecare, ce indică amplitudinea pe un ciclu de avans/retragere de către modulul prehensor în funcție de timp [33].

Deplasarea de avans și de retragere realizează împreună o cursă de 102 mm. Măsurarea vibrațiilor pe cele 3 direcții x, y, z s-a realizat independent pentru a evidenția diferențele de vibrații.

9271	11	58
0	14075	22569
53711	1588	19690
520	14990	26852
6352	5188	12879
354	24106	46558
350	6009	39535
186	1122	166
137	78	1226
1143	70	22935
352	1302	0
74	1096	3195
1076	1169	372
266	18148	125
36132	30709	300
345544	335426	950
42976	4843	2459
22356	52460	5054
33796	426	89
36684	79	36
2133	62	1420

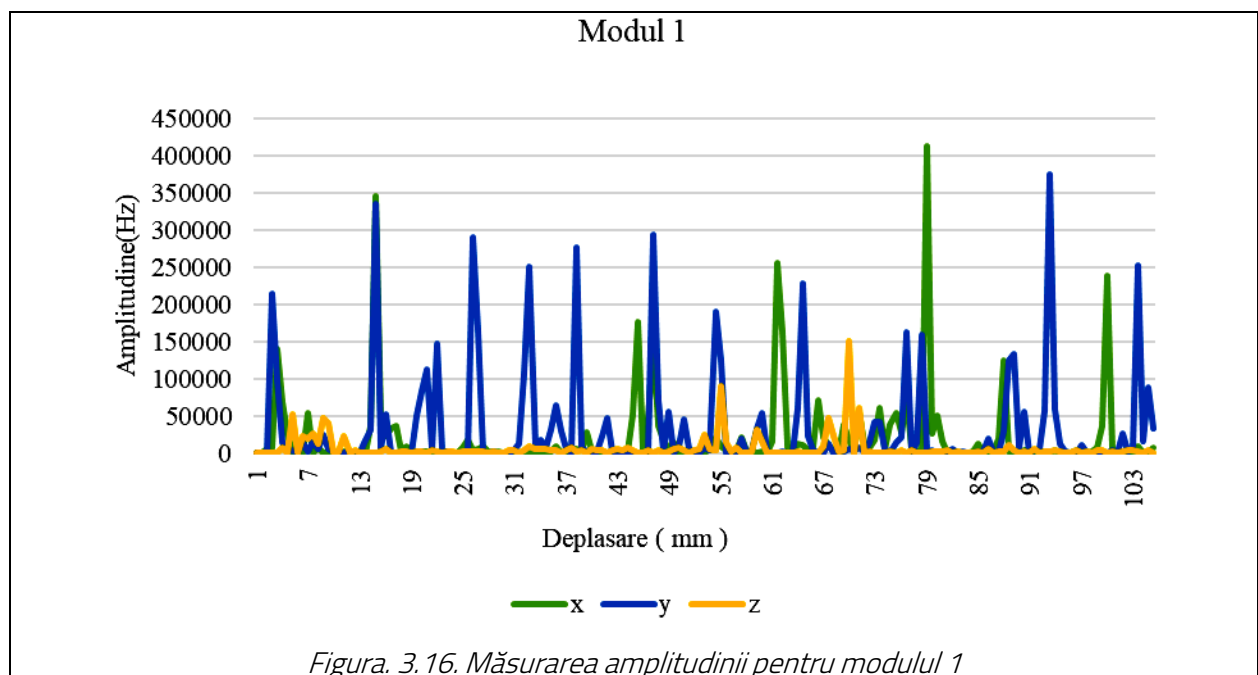
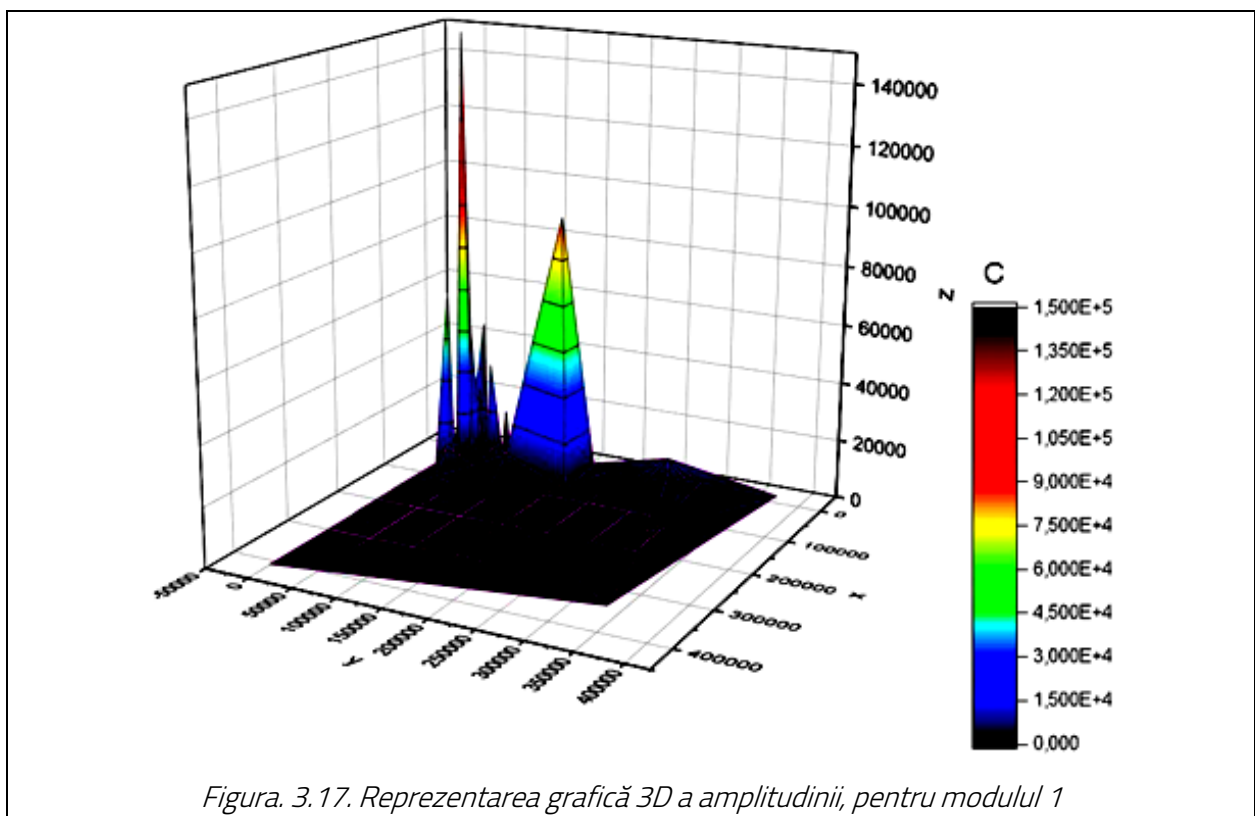
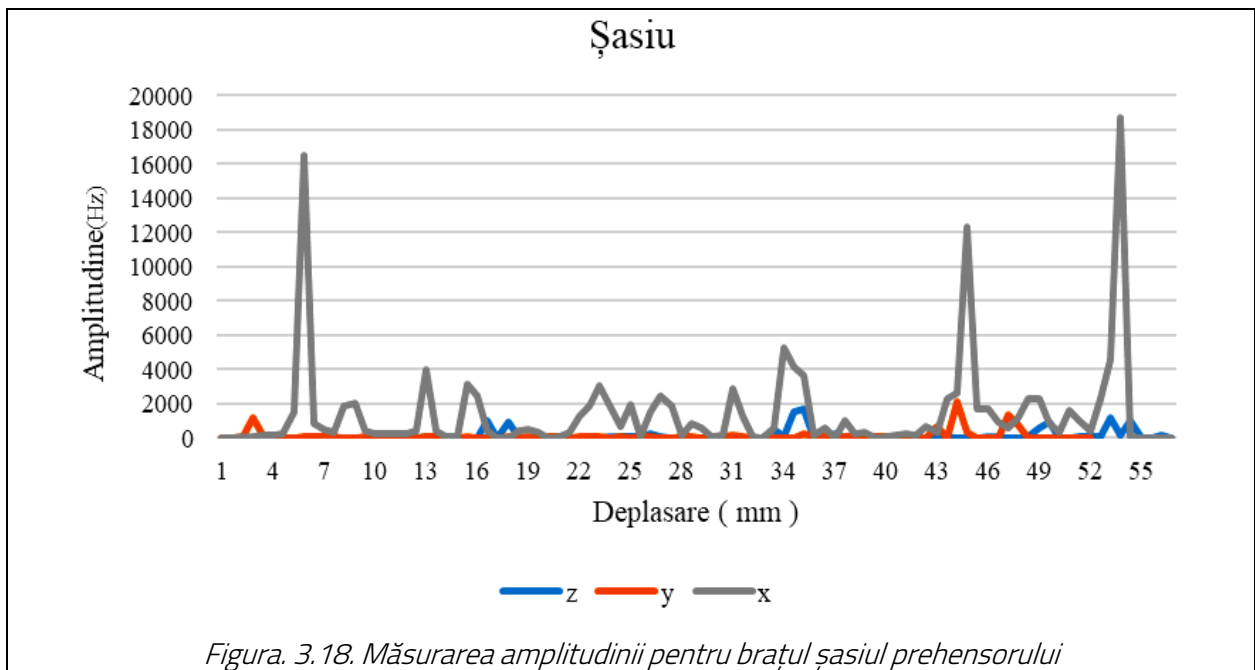


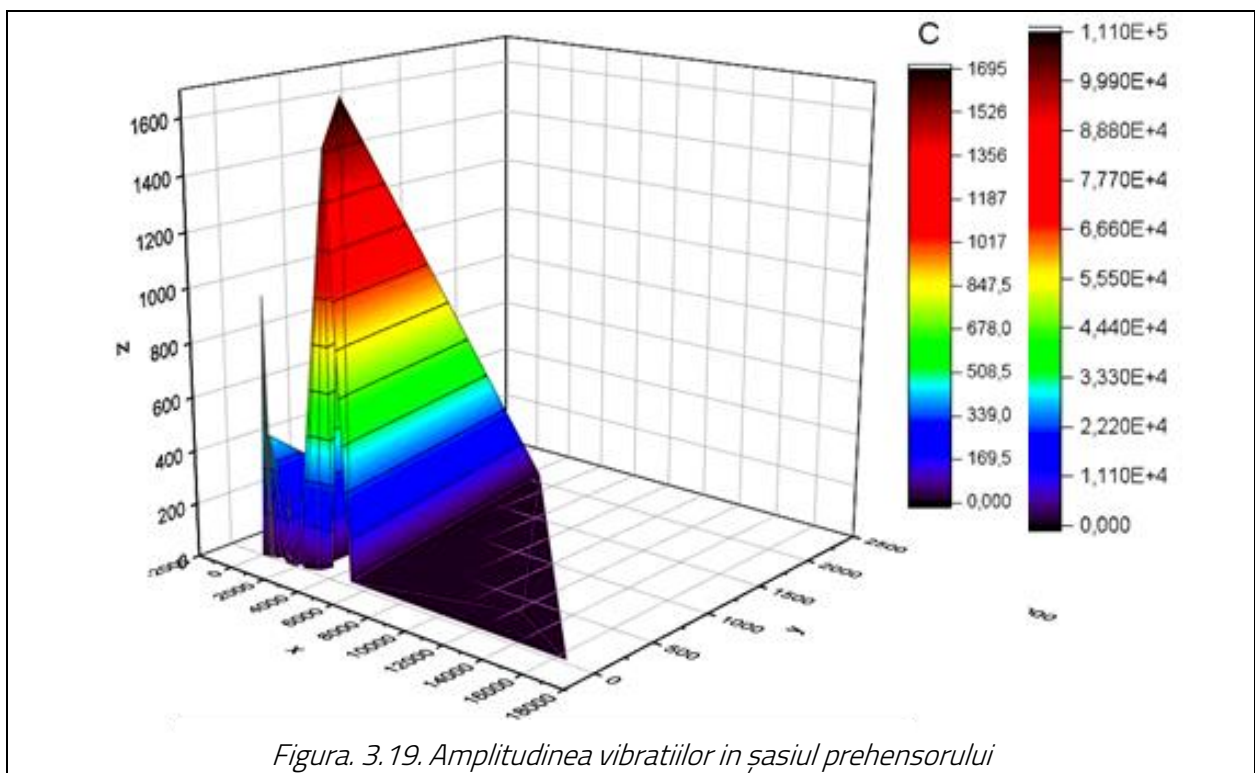
Figura. 3.16. Măsurarea amplitudinii pentru modulul 1



În urma valorilor măsurate pentru modulul 1 s-a realizat graficul din Figura. 3.16, unde este reprezentată amplitudinea pe o deplasare de 102 mm într-o unitate de timp.

Conform datelor se observă că deplasarea modulului generează vibrații mari, depășind valorile nominale (0-1000), așadar valoarea maximă în punctul 131 ajunge la valoarea de 413593 pe direcția X, urmat de punctul 155 cu valoarea 375741 pe direcția Y.





Pentru șasiu s-a realizat graficul Figura. 3.18, unde este reprezentată amplitudinea pe o deplasare de 102 mm a tuturor brațelor, acționate alternativ și simultan.

Conform datelor se observă că deplasarea brațelor generează vibrații mari, depășind valorile nominale (0-500), unde valoarea maximă în punctul 89 ajunge la valoarea de 18736 pe direcția X, urmat de punctul 73 cu valoarea 2103 pe direcția Y și punctul 57 cu valoarea 1541 pe direcția Z.

După cum se observă, vibrațiile transmise în șasiu au valori mult mai mici deoarece este aproape de zona de fixare a cadrului.

3.6. Concluzii

În urma valorilor măsurate și a analizei structurii mecanice s-au înregistrat date ale vibrațiilor foarte mari. Vibrațiile măsurate cu o amplitudine foarte mare sunt cauzate de către șocurile mecanice generate de modulele prehensor la avans și la retragere.

Prin rotirea axului motorului pas cu pas sistemul nu poate controla oprirea acestor module și nici nu le poate frâna la sesizarea contactorului de capăt de cursă, astfel acestea generează șocuri în sistem lovind de axul central.

Prehensorul autoadaptiv este proiectat pentru a asigura o prehensiune eficientă a obiectelor prin utilizarea degetelor de prehensiune fixate pe același ax. Acest design permite adaptabilitate mecanică și capacitatea de a prehensa obiecte de diverse forme și dimensiuni.

Studiul adaptivității sistemului a evidențiat capacitatea acestuia de a prehensa obiecte atât regulate, cât și neregulate. Simulările în programul Catia au demonstrat că prehensorul poate ajusta mișcările și unghiurile pentru a se adapta la forme variate de obiecte, asigurând o prehensiune sigură și eficientă.

Implementarea sistemului electric și software a implicat utilizarea unor componente specifice precum drivere de motoare, controler ATmega2056, module Bluetooth etc. Aceste componente sunt cruciale pentru controlul precis al mișcărilor și pentru asigurarea unei funcționări corecte și sigure a prehensorului.

Vibrațiile în timpul prehensiunii au fost investigate utilizând senzori SW-18010P pe trei axe diferite (x, y, z). Rezultatele au arătat că mișcările brațelor prehensorului generează vibrații semnificative, iar analiza acestora este esențială pentru optimizarea performanței și reducerea posibilităților alunecări ale obiectului.

Prehensorul autoadaptiv demonstrează o funcționare robustă și adaptabilitate la variate condiții de prehensiune. Totuși, pentru a îmbunătăți performanța în ceea ce privește reducerea vibrațiilor și optimizarea mișcărilor, sunt necesare îmbunătățiri continue ale designului și implementarea unor strategii avansate de control și monitorizare.

4. MODIFICAREA ȘI IMPLEMENTAREA STRUCTURALĂ A MODULULUI PREHENSOR ÎN URMA CONCLUZIILOR

Obiectivul propus în acest capitol a fost de a îmbunătăți performanțele prehensorului prin adaptarea structurii mecanice, reducerea vibrațiilor și optimizarea acționării cu ajutorul unui reductor, pentru a asigura o manipulare precisă și fără probleme a obiectelor.

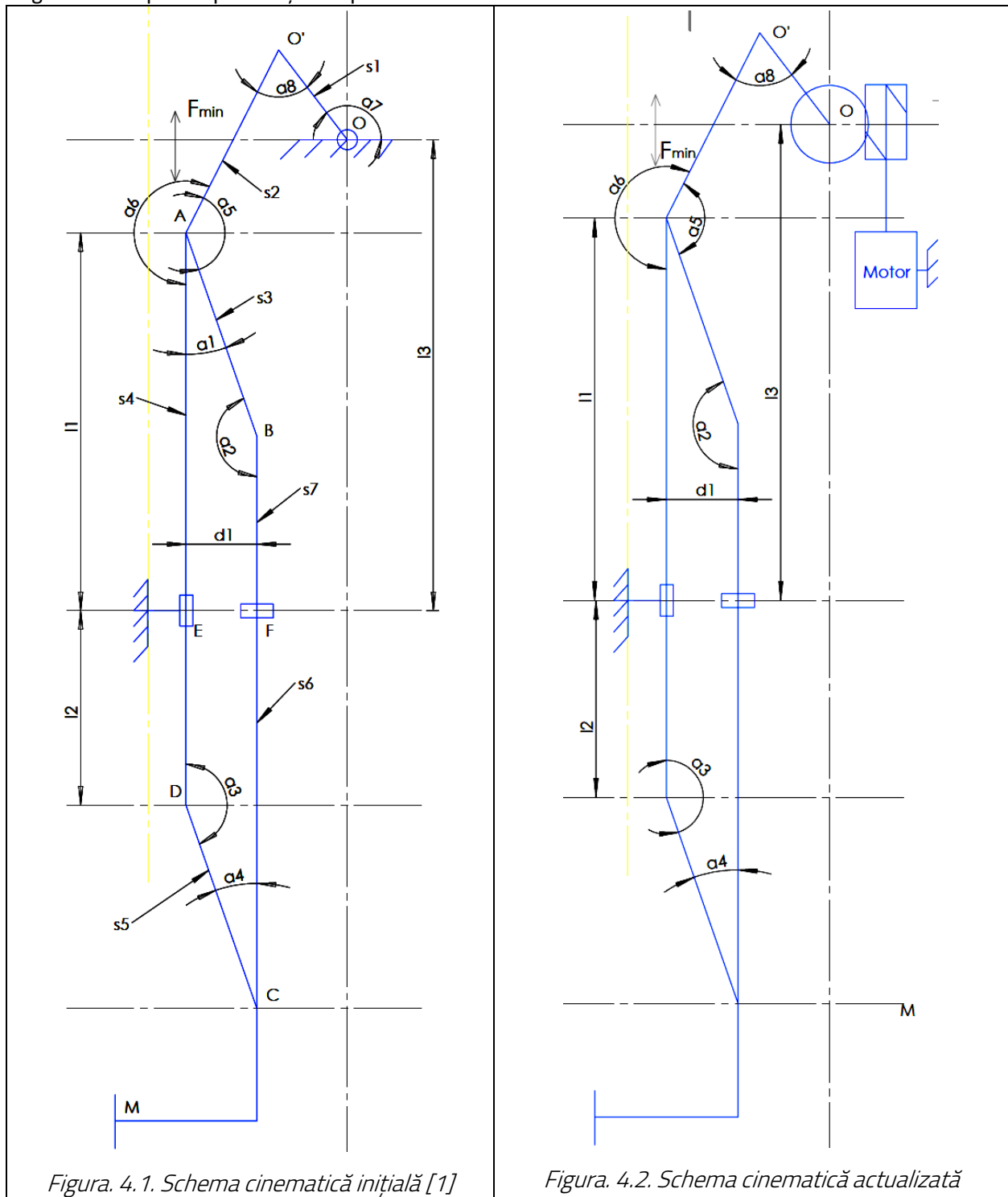


Figura 4.1. Schema cinematică inițială [1]

Figura 4.2. Schema cinematică actualizată

4.1. Modificarea schemei cinematice

În urma analizelor vibrațiilor s-a adaptat structura mecanică inițială (Figura. 4.1) și s-a generat o schemă cinematică actualizată, conform Figura. 4.2.

În sistemul mecanic inițial antrenarea modulului prehensor se realizează cu un motor pas cu pas direct, iar mișcarea unghiulară se face direct pe ax, punctul A din Figura. 4.1 și Figura. 4.2. Prin rotirea axului motorului pas cu pas se modifică lanțul de unghiuri generând mișcarea de translație care modifică distanța (d_3).

Indiferent de sistemul de acționare, sistemul mobil al modulului prehensor realizează o mișcare ușor accelerată. La pornirea prehensiunii pentru un unghi micșorat cu $1,8^\circ$, bacul prehensorului se deplasează cu 0,5 mm, iar la capătul cursei pentru un unghi de $1,8^\circ$, bacul se deplasează 3,8 mm.

În cazul primei variante de acționare a modulului prehensor, la capătul cursei realizând o deplasare mai mare decât cea inițială (fiind acționat direct de axul motorului) acesta nu are spațiu de frânare îndeajuns și generează soc cu axul principal.

Pentru acest tip de acționare s-a generat un tabel unde se exemplifică deplasarea bacului față de ax în funcție de unghi.

Motorul pas cu pas exercită o forță de tracțiune de 39.97 Kg*m, ceea ce înseamnă că dezvoltă un cuplu de 3.92 Nm.

Pe structura mecanică nouă, unde a fost implementat reductorul, se obțin avantaje din punct de vedere cuplu și precizie eliminând din șocurile generate de vechiul sistem.

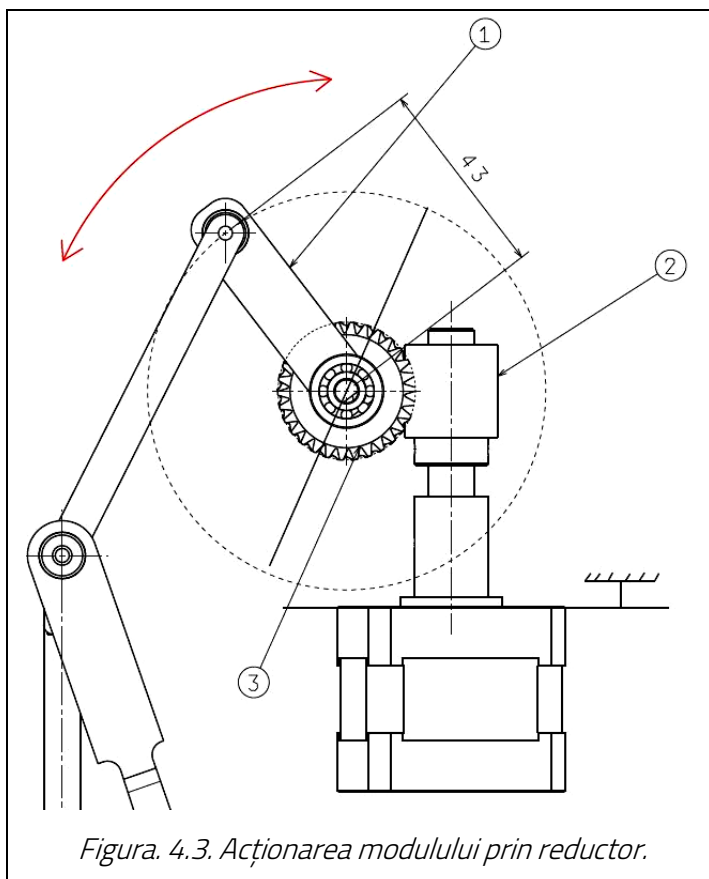


Figura. 4.3. Acționarea modulului prin reductor.

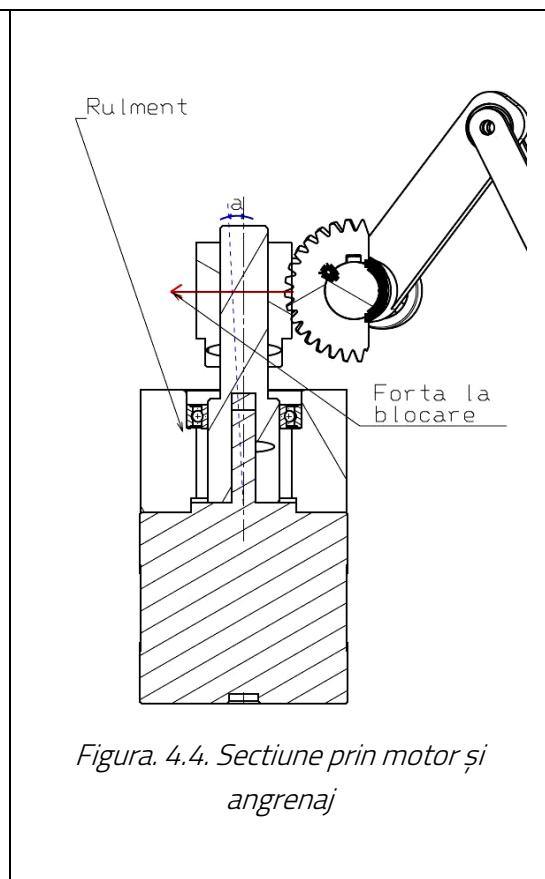


Figura. 4.4. Secțiune prin motor și angrenaj

În sistemul de acționare actual, motorul transmite mișcarea de rotație în roata melcată (2), amplificând cuplul și transmițând la rândul ei mișcarea unei roți dințate (3) cu un modul de 1,25.

Pe roata dințată se află axul ce generează mișcarea de rotație și o imprimă în brațul (1).

Raportul este amplificat $R= 30:1$, ceea ce înseamnă că:

$$F = F_m \cdot R; \quad (4.1)$$

Acest sistem rezolvă problema vibrațiilor datorită faptului că pentru unghiul de 61.2° motorul pas cu pas nu mai realizează numărul de 35 de pași.

O rotație întreagă a motorului pas cu pas se realizează cu un număr de 200 de pași, rezultând astfel faptul că toleranța sistemului în 35 de pași este foarte mare.

Având în vedere că pentru a realiza unghiul de 61.2° sunt necesari 35 de pași, rezultă că prin implementarea reductorului sunt necesari 833 de pași, prin urmare motorul realizează 3,675 de rotații complete.

Prin sistemul de reducere se pot controla cu ușurință accelerația generată de pârghiile modulului prehensor cât și sensibilitatea acestuia, indiferent de viteza declarată în program a motorului. Pasul unghiular al motorului pas cu pas este de $1,8^\circ$, devenind la ieșirea reducerei un pas de $0,06^\circ$, ceea ce duce la creșterea preciziei sistemului.

4.2. Calculul matematic în vederea diminuării raportului de transmitere

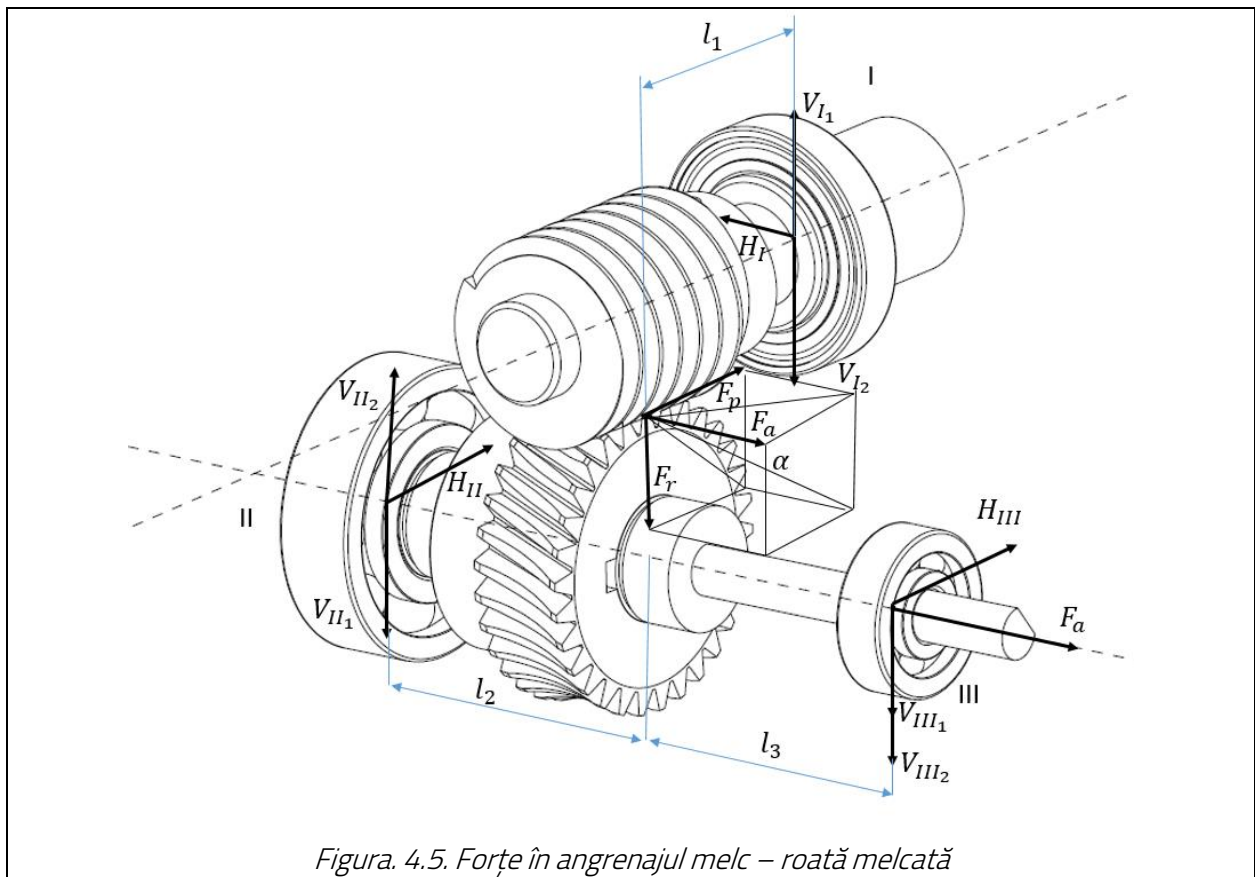


Figura. 4.5. Forțe în angrenajul melc – roată melcată

Forța periferică F_a pentru melc se determină ca și forța F_p pentru o roată dințată cilindrică:

$$F_a = \frac{2M_{t_{el}}}{d_{r1}}. \quad (4.2)$$

Coefficientul de frecare pentru cuplul de materiale oțel-bronz, $\mu = 0,002 \div 0,03$

Forța axială, F_a , se preia de către un singur lagăr la arborele melcului $F_{aI} = F_p$, pentru arborele roții dințate $F_{aII} = F_p$ sau $F_{aIII} = F_p$.

$$F_r = F_a \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha \cdot \sin \beta + \mu \cdot \cos \beta}. \quad (4.3)$$

$$F_p = F_a \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta - \mu \cdot \beta \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \sin \beta + \mu \cdot \cos \beta}. \quad (4.4)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_e}{2\pi \cdot r_{r1}} = \frac{S \cdot P_a}{2\pi \cdot r_{r1}}. \quad (4.5)$$

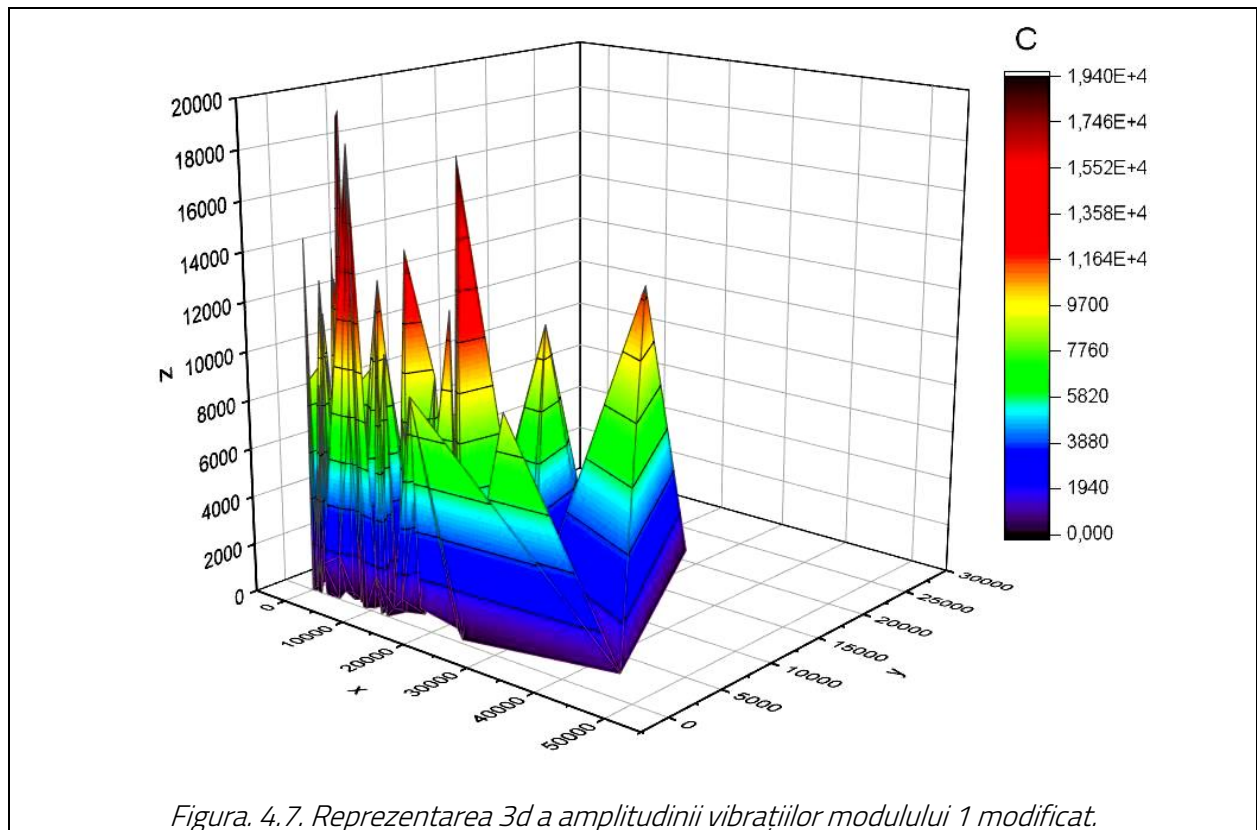
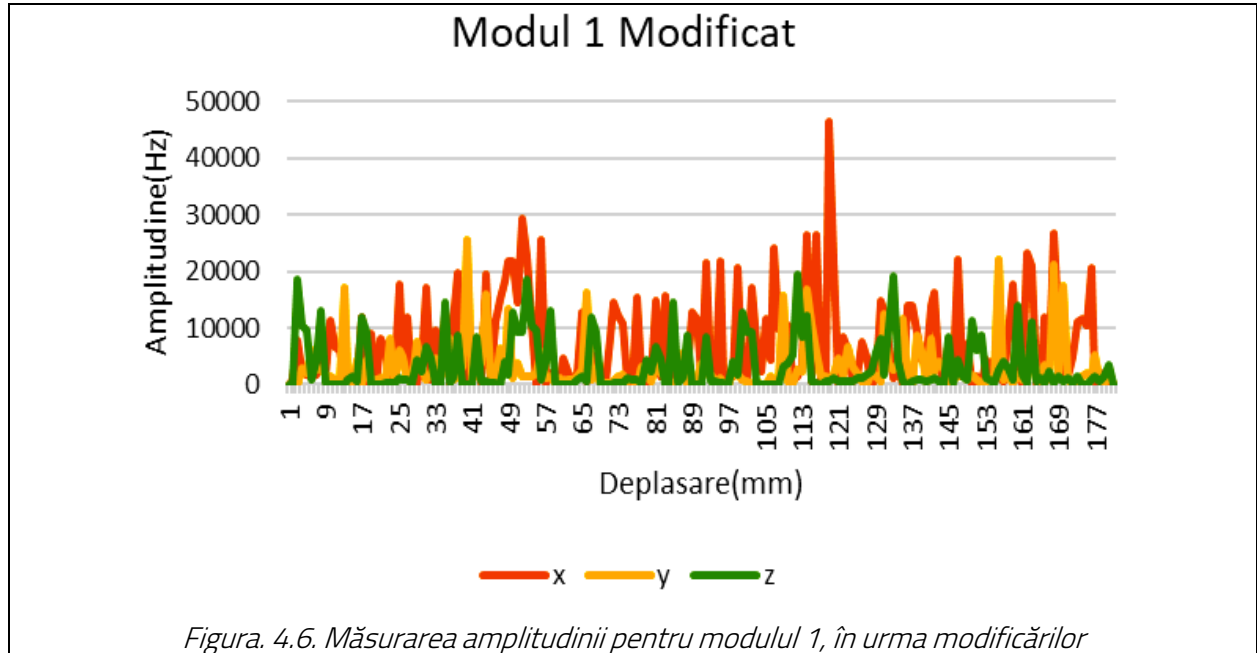
Tabelul 4.1. Reacțiunile forțelor în lagărele I, II, III

Lagăr I	Lagăr II	Lagăr III
Reacțiunile datorită forței F_a :		
$H_I = F_a \frac{1}{l_1}$	$H_{II} = F_a \frac{r_{r2}}{l_2 + l_3}$	$H_{III} = F_a \frac{r_{r2}}{l_2 + l_3}$
Reacțiunile datorită forței F_r :		
$V_{I_1} = F_r \frac{1}{l_1}$	$V_{II_1} = F_r \frac{l_3}{l_2 + l_3}$	$V_{III_1} = F_r \frac{l_2}{l_2 + l_3}$
Reacțiunile datorită forței F_p :		
$V_{I_2} = F_p \frac{r_{r1}}{l_1}$	$V_{II_2} = F_p \frac{r_3}{l_2 + l_3}$	$V_{III_2} = F_p \frac{l_2}{l_2 + l_3}$
Încărcarea rezultantă:		
$F_{r_I} = \sqrt{H_I^2 + (V_{I_2} - V_{I_1})^2}$	$F_{r_{II}} = \sqrt{H_{II}^2 + (V_{II_1} - V_{II_2})^2}$	$F_{r_{III}} = \sqrt{H_{III}^2 + (V_{III_1} - V_{III_2})^2}$

4.3. Analiza vibrațiilor exercitate asupra modulelor după modificări

Pentru modulul 1 s-a realizat graficul din Figura. 4.6 în urma modificărilor, unde este reprezentată amplitudinea vibrațiilor pe o deplasare de 176 mm.

Conform datelor se observă că deplasarea modulului generează vibrații mici – medii, depășind valorile nominale (0-1000), unde valoarea maximă în punctul 119 ajunge la valoarea de 46415 pe direcția X, urmat de punctul 40 cu valoarea 25623 pe direcția Y și punctul 112 cu valoarea 19343 pe direcția Z.

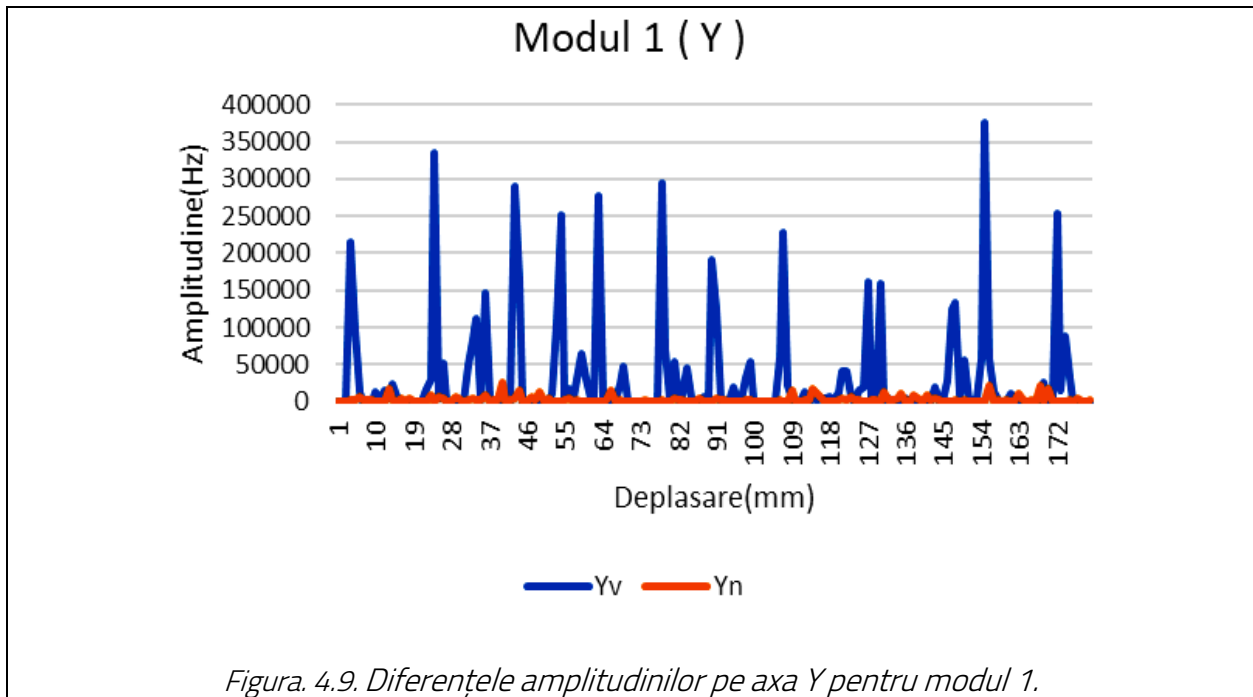
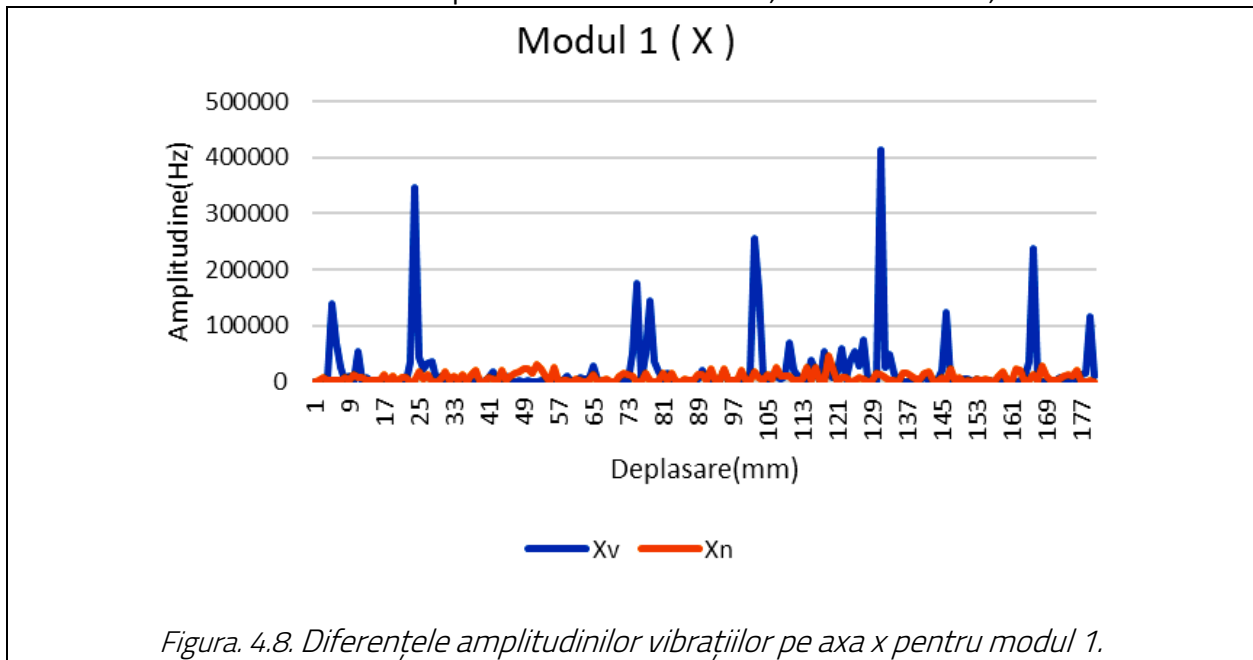


4.4. Diferențele amplitudinilor modulelor pe cele 3 direcții măsurate.

În urma măsurătorilor amplitudinilor după ce au fost implementate modificările mecanice la acționarea modulului prehensor s-au realizat graficele Figura. 4.8, Figura. 4.9, Figura. 4.10, pentru modulul 1 ce reprezintă diferențele majore dintre cele două sisteme.

Diferențele sunt:

- Pe axa X sistemul vechi are amplitudinea maximă 413953, iar cel nou 46415;
- Pe axa Y sistemul vechi are amplitudinea maximă 375471, iar cel nou 25623;
- Pe axa Z sistemul vechi are amplitudinea maximă 149650, iar cel nou 19343;



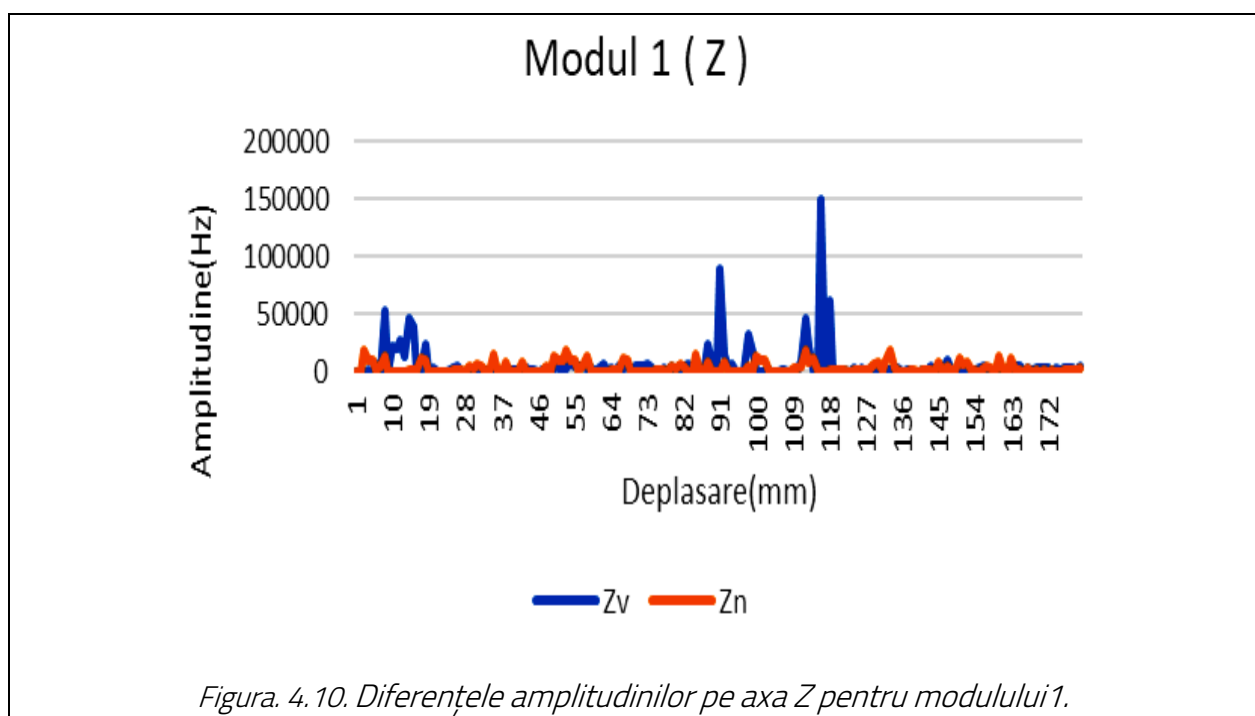


Figura. 4.10. Diferențele amplitudinilor pe axa Z pentru modulului 1.

4.5. Concluzii

Implementarea reductorului a dus la o reducere semnificativă a vibrațiilor și la îmbunătățirea preciziei mișcărilor. Adaptarea structurii mecanice a permis o mai bună distribuție a forțelor și a scăzut impactul negativ asupra axului principal în urma mișcărilor prehensiunii.

Capacitatea de control al accelerației și sensibilității prehsorului a fost îmbunătățită semnificativ prin utilizarea reductorului, adaptându-se eficient la diferite condiții de operare.

Amplitudinile măsurate pentru fiecare componentă a prehsorului au indicat o scădere semnificativă a vibrațiilor, comparativ cu configurația inițială.

Analiza detaliată a datelor a demonstrat că modificările structurale au fost eficiente în reducerea vibrațiilor la niveluri acceptabile, îmbunătățind astfel stabilitatea și fiabilitatea prehsorului în operațiuni practice.

5. PROIECTAREA SISTEMULUI SENZORIAL DE PREHENSARE

Obiectivul propus acestui capitol a fost dezvoltarea și implementarea unui sistem senzorial de prehensiune autoadaptiv eficient și precis pentru manipularea obiectelor într-un mediu industrial.

5.1. Dezvoltarea arhitecturii logice a sistemului senzorial în vederea realizării autoadaptivității

Arhitectura logică pentru fiecare modul este concepută să realizeze prehensarea independent din punct de vedere mecanic, electric și software.

Prehensarea autoadaptivă este realizată în 3 pași:

- *Pasul 1* – În această etapă se declară stările senzorilor în poziția de retras a modului, dacă modulul este în poziția de avans sau într-o altă poziție intermediară, atunci controlerul ia decizia să ducă în poziția de avans și va aștepta comanda pentru a realiza o prehensare nouă.
- *Pasul 2* – În această etapă, s-a primit comanda de avans a modului, iar sistemul senzorial este în starea „ON” permanent așteptând colectarea unor noi stări. Această etapă se poate finaliza în cazul în care sistemul senzorial și-a îndeplinit condiția software și anume:
 1. Bacul modulului a intrat în contact cu obiectul ce urmează a fi preluat.
 2. După intrarea în contact se realizează strângerea până când se atinge forța declarată în software.
 3. Obiectul nu se mai mișcă după ce s-a realizat strângerea.
- *Pasul 3* – După ce s-a realizat pasul 2, sistemul senzorial detectează nerespectarea condiției „3” din pasul 2, ceea ce înseamnă că s-a detectat alunecarea obiectului preluat și intră în faza de retragere. Dacă și după strângerea ulterioară sistemul senzorial detectează mișcare se va realiza din nou strângerea, acest lucru se va repeta până când sistemul senzorial atinge pragurile maxime declarate și anume:
 - Forța a depășit limitele maxime
 - Alunecarea a ajuns în punctul maxim

În momentul în care s-a atins una dintre limitele maxime, dintre condițiile de mai sus, atunci modulul va opri prehensarea.

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

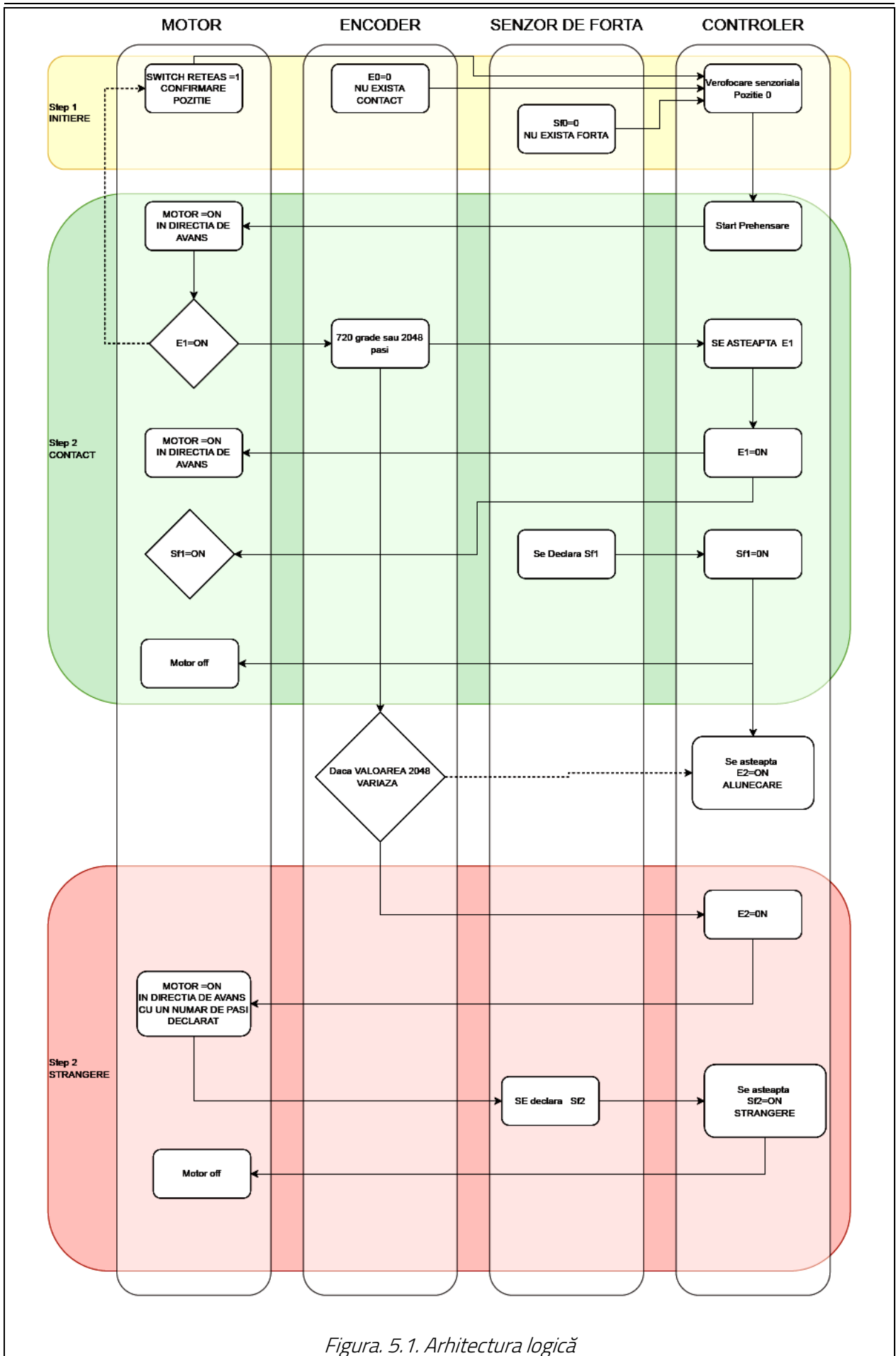


Figura. 5.1. Arhitectura logică

5.2. Prezentarea sistemului senzorial.

Sistemul senzorial este format dintr-un encoder rezistiv (1) ce are un ax care exercită o mișcare de rotație, iar acesta generează valori ce sunt amplificate de un sistem electronic pentru a putea fi citite. Encoderul este acționat prin intermediul unei curele elastice (6) ce realizează o transmisie amplificată dintre două roți de antrenare. Roata de antrenare (2) ce transmite mișcarea către encoder are și rolul de a tensiona cureaua de antrenare. Fiecare valoare generată de encoder corelează cu poziția axului motorului pas cu pas în timp real pentru a putea lua o decizie dacă este nevoie să se exercite o forță mai mare sau mai mică asupra produsului [34].

Tot sistemul este antrenat de o platbandă care formează o pârghie cu primul sistem de rotație care în același timp realizează și o mișcare de translație față de orizontala sistemului. Platbanda ce realizează o mișcare de translație nu aduce niciun efort asupra produsului prehenat, iar odată ajunsă la capătul cursei este detectat contactul ferm al obiectului de către un senzor inductiv (3). Tot sistemul senzorial este activat odată cu confirmarea de contact a senzorului inductiv (Figura. 5.2) [35].

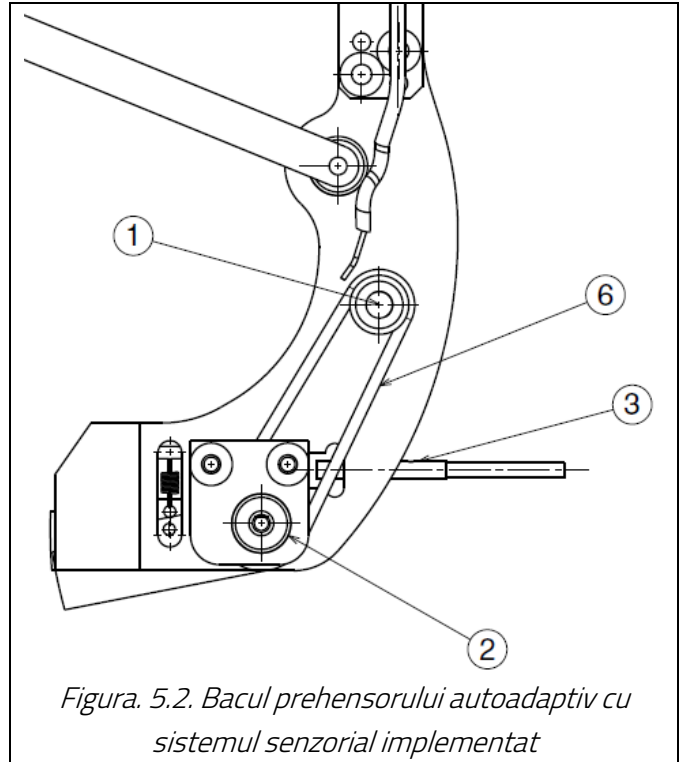


Figura. 5.2. Bacul prehensorului autoadaptiv cu sistemul senzorial implementat

5.2.1. Descrierea procesului de strângere a senzorului

Bacul prehensorului adaptiv cu 5 module în care este implementat sistemul senzorial de alunecare interschimbabil. În secțiunea reprezentată se observă mișcarea de rotație pe care aceasta o realizează după contactul cu obiectul. Etapele prehensării cu sisteme senzoriale de alunecare sunt:

- Motorul pas cu pas acționează brațul prehensorului până când platbanda din bac atinge produsul și confirmă senzorul inductiv;
- După ce senzorul de prezență confirmă, motorul mai strânge cu maxim 5%;
- Dacă produsul se mișcă în baci datorită inerțiilor sau a greutății mai mari decât forța exercitată asupra lui după ce acesta este prehenat, atunci platbanda face o mișcare de rotație în jos, iar în

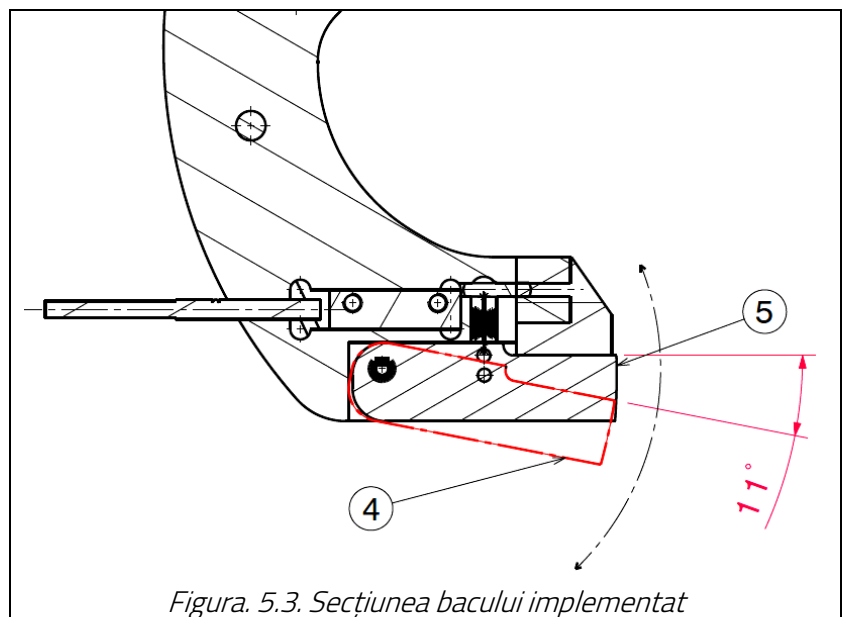


Figura. 5.3. Secțiunea bacului implementat

aceiași timp la fiecare 0,1° motorul pas cu pas pune o presiune mai mare asupra produsului până când acesta nu se mai mișcă.

Platbanda realizează mișcarea de rotație din poziția (5) în poziția (4), astfel face o rotație maximă de 11°, iar după aceea ea revine în poziția inițială (5) cu ajutorul unui arc de tracțiune (Figura. 5.3).

5.3. Testarea conceptuală a senzorului de alunecare

5.3.1. Realizarea software a sistemului senzorial.

Sistemul senzorial este un sistem în care mai multe valori electrice generate de către senzori sunt cumulate pentru a lua în final o decizie de moment.

```
1  const int potPin = A0;
2
3  void setup() {
4      // Începe comunicația serială la 9600 bps
5      Serial.begin(9600);
6  }
7
8  void loop() {
9      // Citește valoarea analogică de la potențiomtru
10     int potValue = analogRead(potPin);
11
12     // Trimite valoarea citită pe Serial Monitor
13     Serial.print("Valoarea citită: ");
14     Serial.println(potValue);
15
16     // O întârziere pentru a nu supraîncărca Serial Monitor-ul
17     delay(100);
18 }
```

Figura. 5.4. Cod pentru colectarea datelor al encoderului rezistiv

Functia „potValue”- această funcție citește valoarea analogică (de la 0 la 1023) de la pinul la care este conectat potențiomtrul, ceea ce indică poziția curentă a potențiomtrului atunci când tensiunea de ieșire este împărțită. Această funcție este utilizată pentru a controla mai eficient poziția potențiomtrului și pentru a scădea gradul de eroare.

5.3.2. Structura encoderului rezistiv și semnalele generate

Encoderul este un sistem senzorial ce generează semnale electrice sau variații de parametri în funcție de tipul de encoder ales. În sistemul senzorial al prehensorului adaptiv este folosit un encoder de tip rezistiv ce permite o rotație de 360° [37].

El generează variații rezistive către programator pe input-urile acestuia. Semnalul citit de către programator se realizează printr-o intrare analogică cu o funcție de citire, (val = analogRead(Ax)). Variațiile rezistive ale encoderului transformă curentul la ieșire a encoderului într-unul variabil cu o caracteristică liniară, dar și cu o eroare de citire. Eroarea de citire este declarată cu funcția (if ((val „valoarea citită” > previous+3) || (val „valoarea citită” < previous-3))), unde eroarea declarată 3 este pragul de sensibilitate al encoderului. Acest prag declarat este important deoarece există momente când la o anumită poziție mecanică encoderul poate genera valori mai mici sau mai mari chiar dacă este în moment de repaus.

Aceste valori ale erorii sunt variabile și nu trebuie să influențeze mai departe sistemul mecanic, iar în funcție de zgomotul generat de encoder în repaus se stabilește intervalul în care encoderul poate

genera curenți variabili. Encoderul realizează mișcarea de rotație până când acesta este oprit de către componenta mecanică de alunecare la unghiul de 11° (Tabelul 5.1) [38].

5.3.3. Modalitatea de funcționare a senzorului de alunecare rezistiv

Sistemul senzorial, în cazul de față, este format dintr-un senzor de prezență și un senzor de tip encoder. Valorile sunt citite de la encoder atât timp cât senzorul de proximitate confirmă prezența obiectului generând semnalul (1 sau adevarat). În software, senzorul de proximitate de acest tip se declară ca un simplu contactor (int digitalread x), unde x este numărul pinului ales. După declararea conexiunii dintre senzor și programator se declară tipul de conexiune (input) care este un parametru foarte important pentru stabilizarea sistemului ținând cont de rezoluția declarată în programarea motorului pas cu pas. Pentru un motor pas cu pas cu rezoluția de 150 declarată sub forma (stepresolution 150) acesta realizează un pas atunci când valoarea erorii encoderului este depășită. Pentru re poziționarea motorului se citește în timp real valoarea generată în permanentă de encoder cu funcția (previous = val(valoarea actuala)).

Tabelul 5.1. Valori generate de encoder pe SerialMonitor

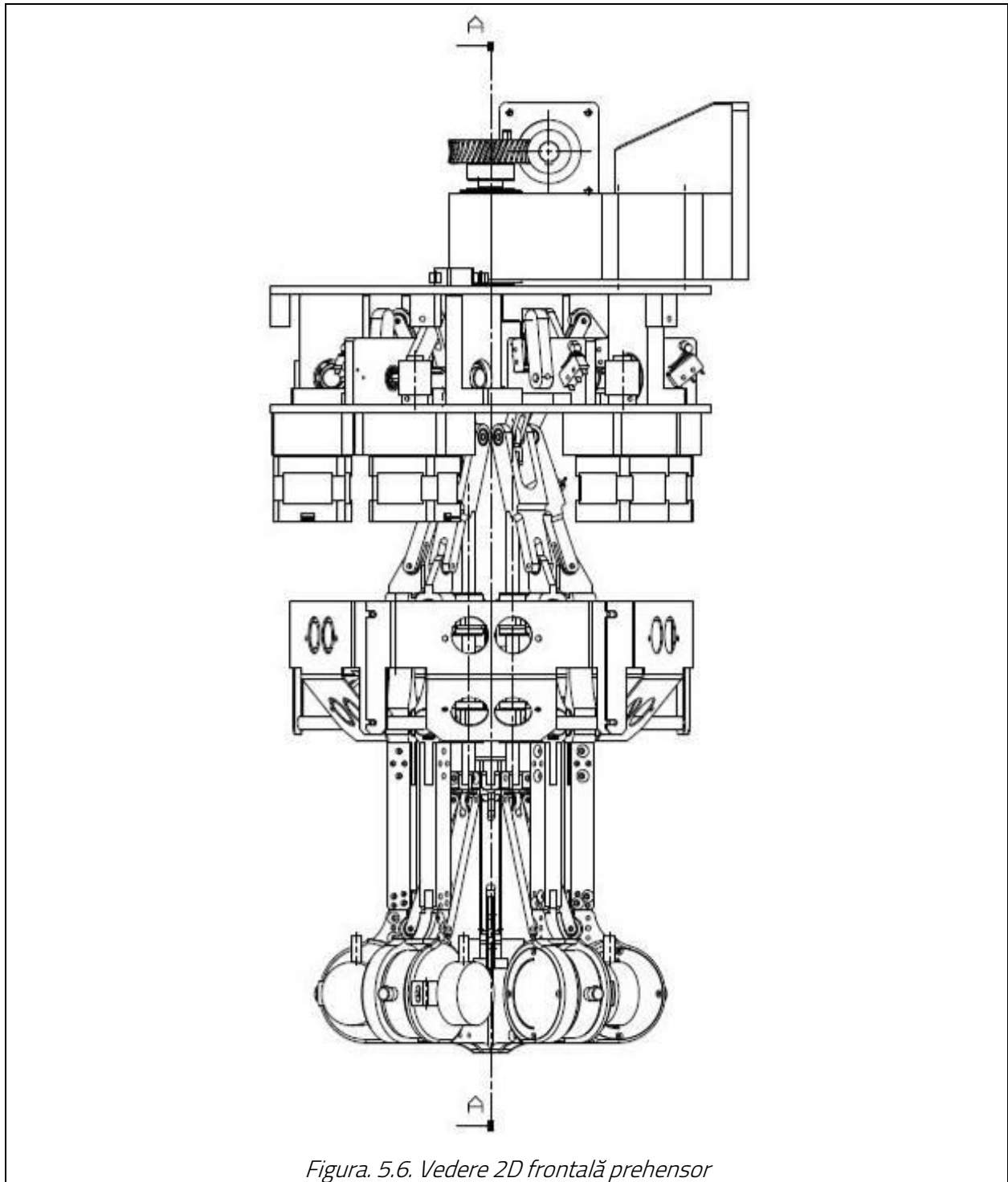
Unghiul realizat de componenta mecanică de alunecare ($^\circ$)	Valorile tensiunilor electrice pe serial monitor(V)	Eroare generata de encoder
0	0	(-0.03 -- +0.03) V
0.5	0.05	(-0.03 -- +0.03) V
1	0.07	(-0.03 -- +0.03) V
1.5	0.09	(-0.03 -- +0.03) V
2	0.11	(-0.03 -- +0.03) V
2.5	0.13	(-0.03 -- +0.03) V
3	0.15	(-0.03 -- +0.03) V
3.5	0.17	(-0.03 -- +0.03) V
4	0.19	(-0.03 -- +0.03) V
4.5	0.21	(-0.03 -- +0.03) V
5	0.23	(-0.03 -- +0.03) V
5.5	0.25	(-0.03 -- +0.03) V
6	0.27	(-0.03 -- +0.03) V
6.5	0.29	(-0.03 -- +0.03) V
7	0.31	(-0.03 -- +0.03) V
7.5	0.33	(-0.03 -- +0.03) V
8	0.35	(-0.03 -- +0.03) V
8.5	0.37	(-0.03 -- +0.03) V
9	0.39	(-0.03 -- +0.03) V
9.5	0.41	(-0.03 -- +0.03) V
10	0.43	(-0.03 -- +0.03) V

5.4. Executarea și integrarea fizică a senzorului pe fiecare modul prehensor respectând structura cinematică



Figura. 5.5. Vedere laterală stânga cu realizarea senzorului

5.5. Reprezentarea prehensurului în forma actualizată cu sistemul senzorial de alunecare.



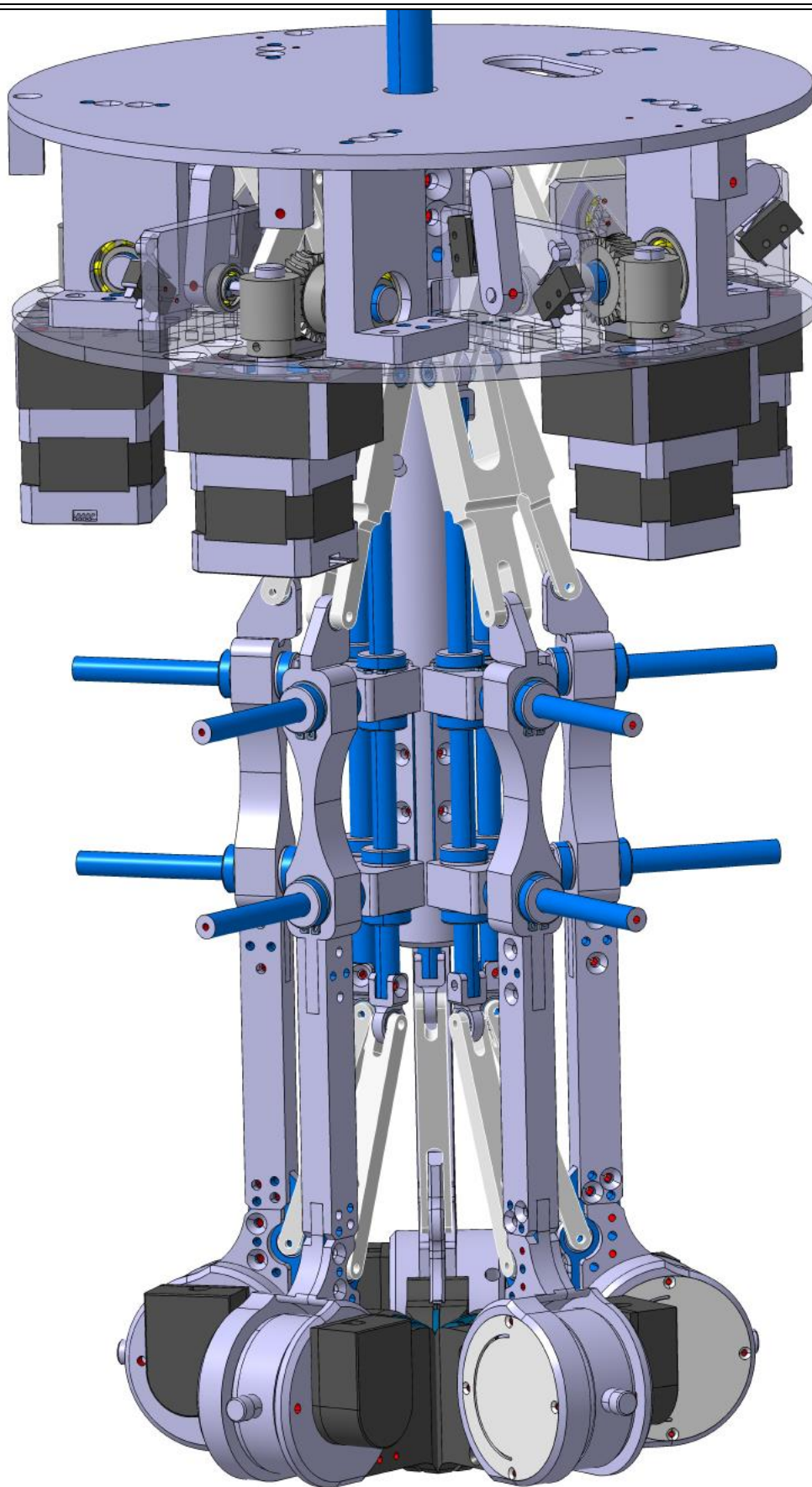


Figura. 5.7. Vedere 3D prehensor

5.6. Determinarea poziționării senzorului de forță cu metoda elementului finit

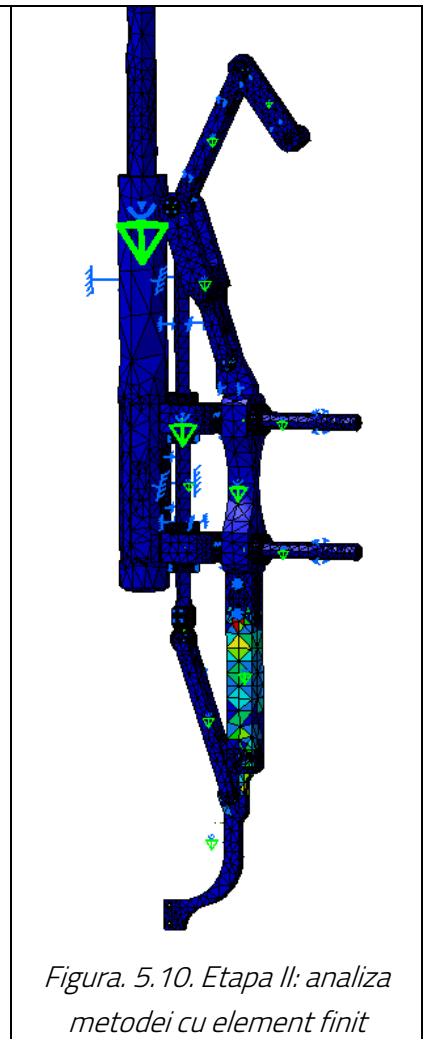
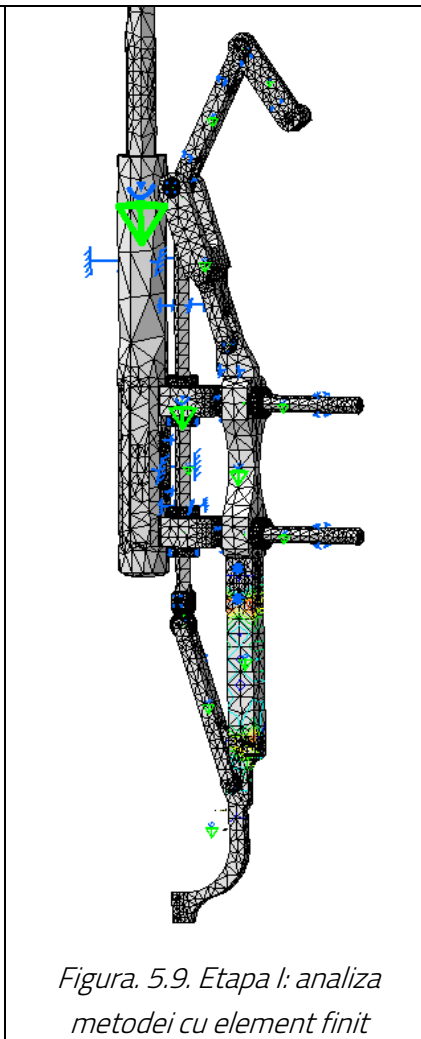
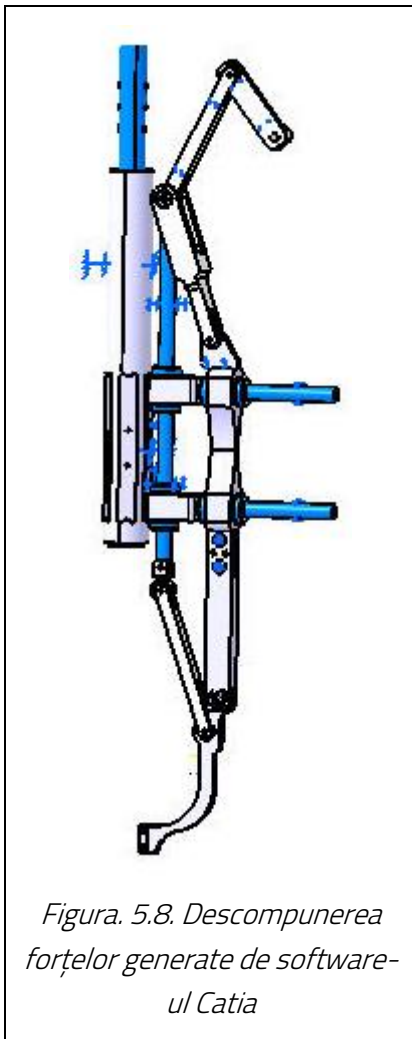
Pentru implementarea senzorilor de forță a fost necesar să se determine poziția ideală. Pentru determinarea poziției s-a analizat structura modulului cu metoda elementului finit unde s-a aplicat o forță de 1 kg. Forța a fost aplicată în partea frontală a bacului.

În scopul determinărilor, s-a declarat materialul utilizat în execuția structurii modulului având caracteristicile din Tabelul 5.2.

Analiza a fost făcută pe structura modulului fără alte sisteme adăugate cum ar fi senzorul de alunecare și alte elemente electronice.

Tabelul 5.2. Caracteristici material utilizat la structură

Material	Aluminium
Young's modulus	7e+010N_m2
Poisson's ratio	0.346
Density	2710kg_m3
Coefficient of thermal expansion	2.36e-005_Kdeg
Yield strength	9.5e+007N_m2



Tabelul 5.3. Valorile forțelor și momentelor rezultate ale modului

Components	Applied Forces	Reactions	Residual	Relative Magnitude Error
Fx (N)	-8.2718e-025	1.6360e-012	1.6360e-012	4.4804e-013
Fy (N)	1.0000e+000	-1.0000e+000	-9.8965e-013	2.7103e-013
Fz (N)	-9.6240e-019	1.5066e-012	1.5066e-012	4.1260e-013
Mx (Nxm)	8.0314e-002	-8.0314e-002	4.7726e-014	3.1647e-014
My (Nxm)	4.9534e-019	-1.4732e-013	-1.4732e-013	9.7690e-014
Mz (Nxm)	-4.7208e-012	4.6514e-012	-6.9400e-014	4.6019e-014

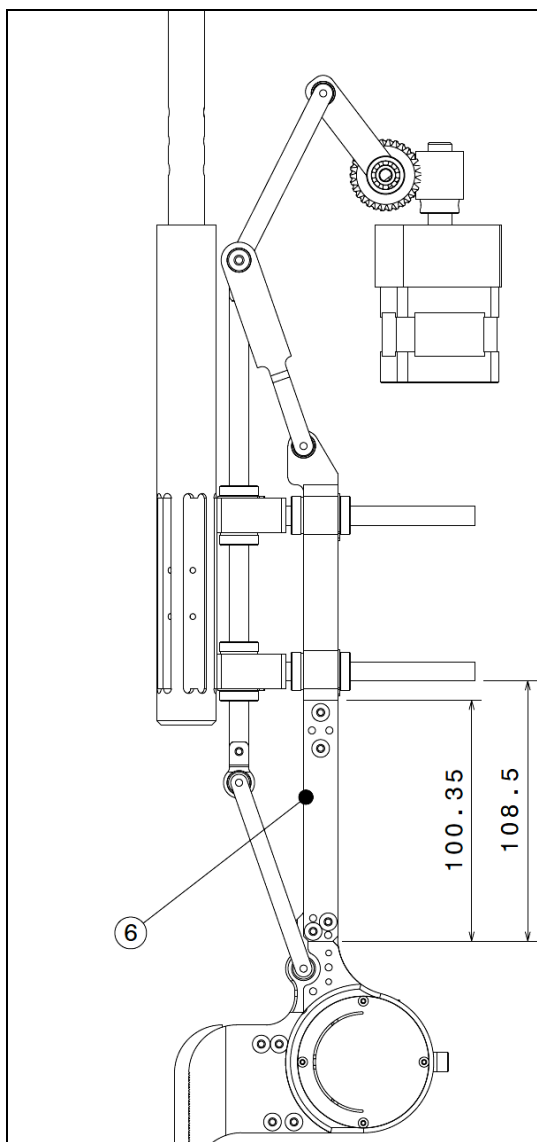


Figura. 5.11. Dimensionarea inițială fără senzor de forță

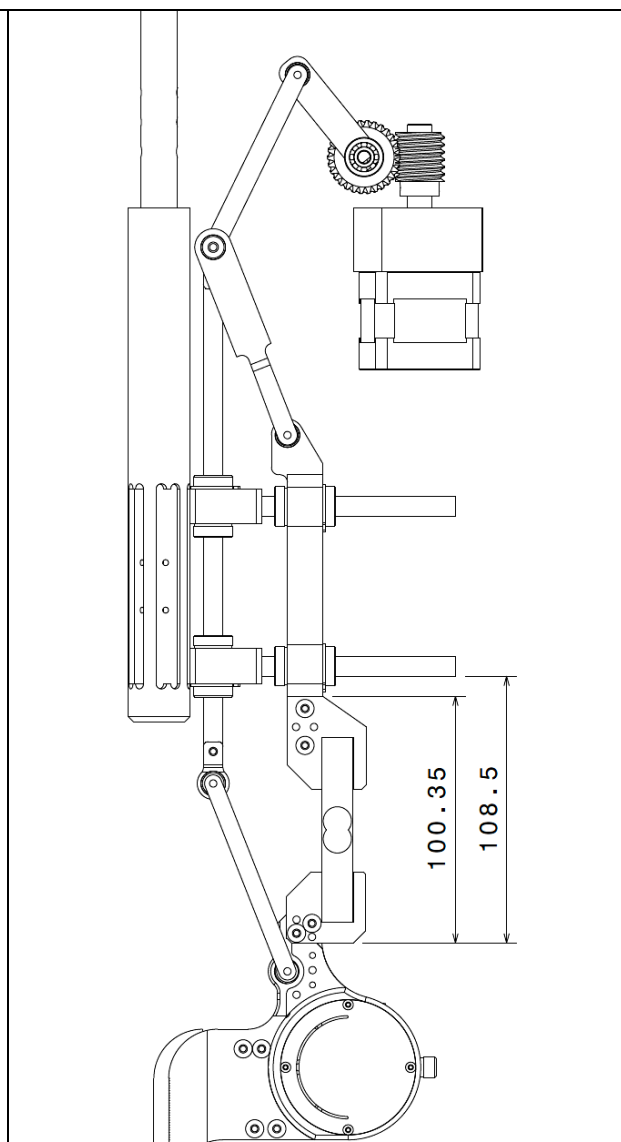


Figura. 5.12. Dimensionarea actualizată cu senzorul de forță

În urma analizei s-au generat simulări cu deformările plastice și elastice ale modulului prehensorului.

Din Figura. 5.9 și Figura. 5.10, se observă zonele de deformare maxime care sunt marcate în culori diferite. Această zonă indică unde trebuie amplasat senzorul de forță pentru obținerea unor rezultate optime.

5.7. Integrarea structurală a senzorilor de forță în vederea autoadaptivității

Implementarea senzorului de forță în 3d respectând schema cinematică

Conform analizei cu metoda elementului finit, elementul cu deformările plastice cele mai accentuate (6), s-a înlocuit cu senzorul de forță respectând structura existentă.

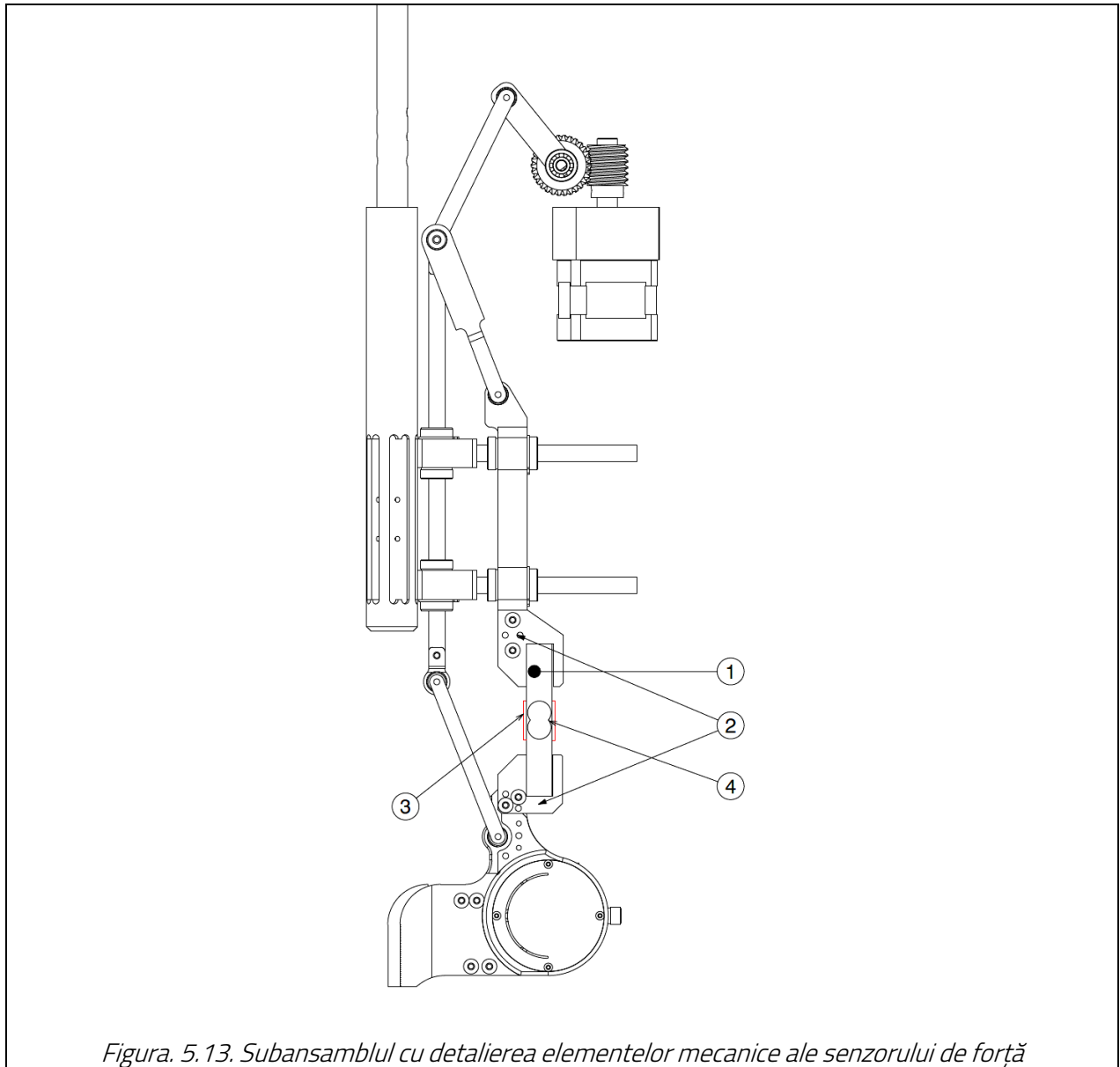


Figura. 5.13. Subansamblul cu detalierea elementelor mecanice ale senzorului de forță

Senzorul de forță este conceput dintr-un material neferos (aluminiu) (1) și o semi-punte wiston care este formată din doi senzori piezorezistivi (3) ce sunt dispuși de o parte și de cealaltă a zonei sensibile (3) care a fost concepută special pentru a crește sensibilitatea la deformare.

Adaptarea celor 5 module prehensor și realizarea noului model de prehensiune final.

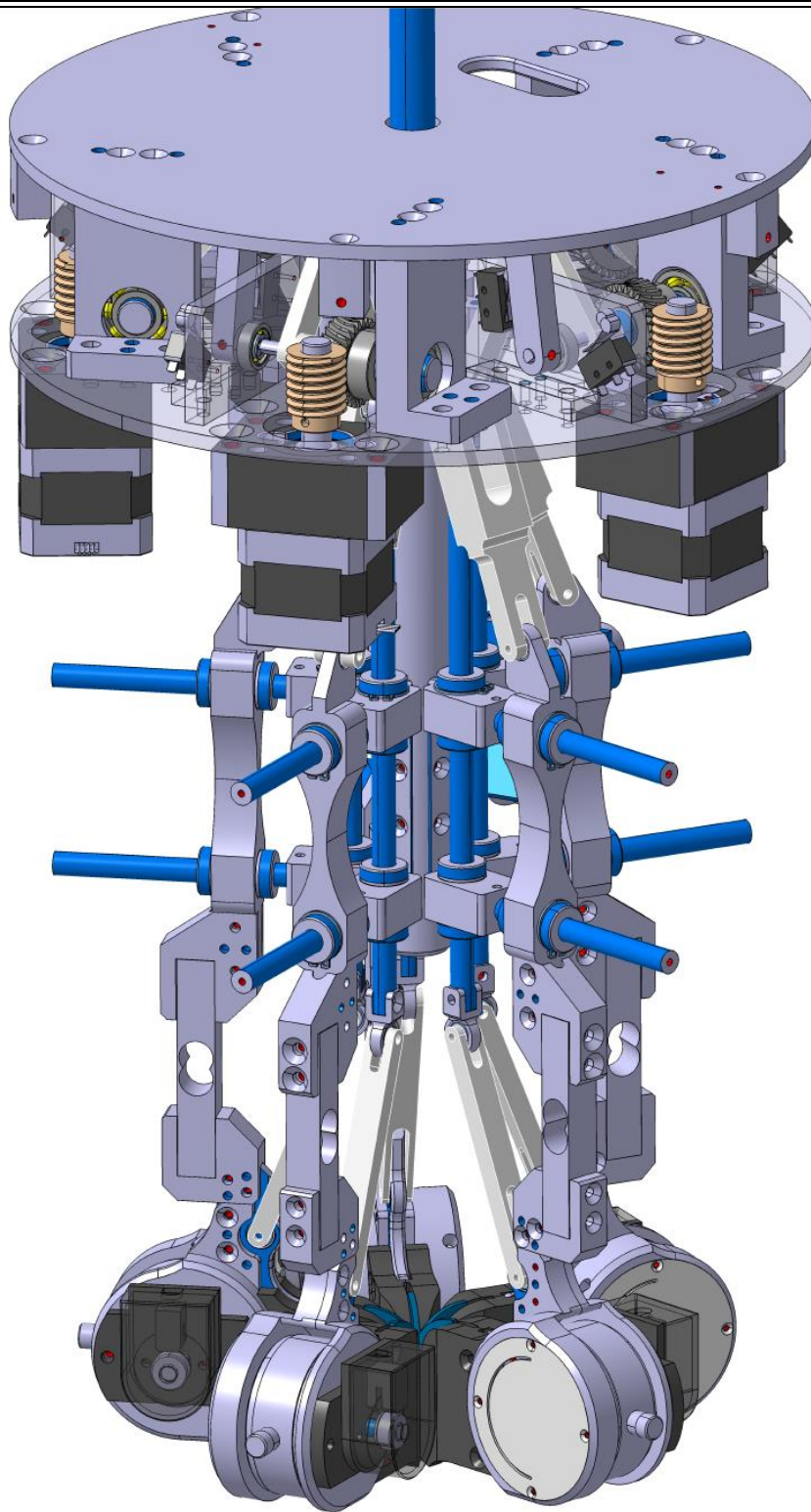


Figura. 5.14. Prehensur autoadaptiv în poziția de avans

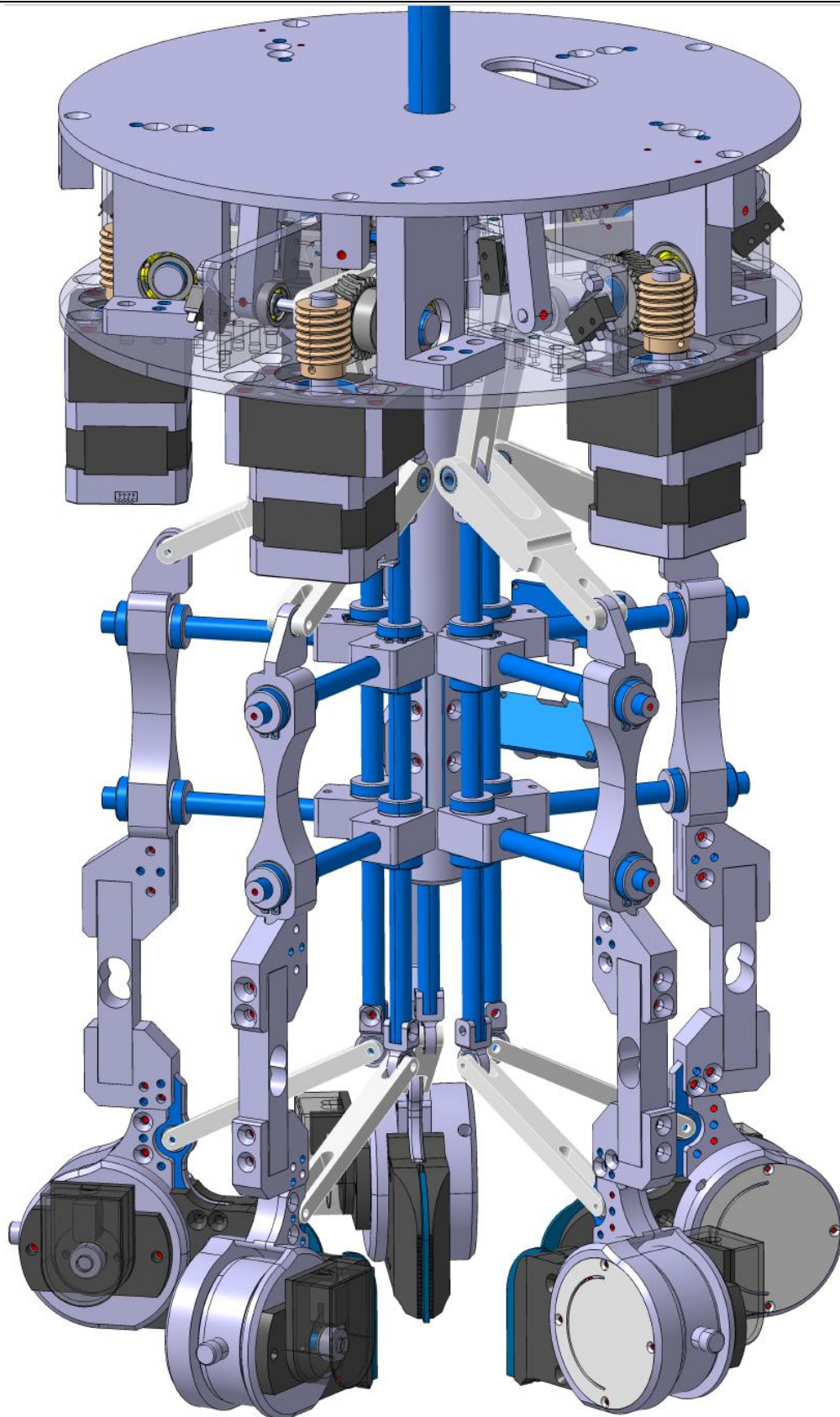
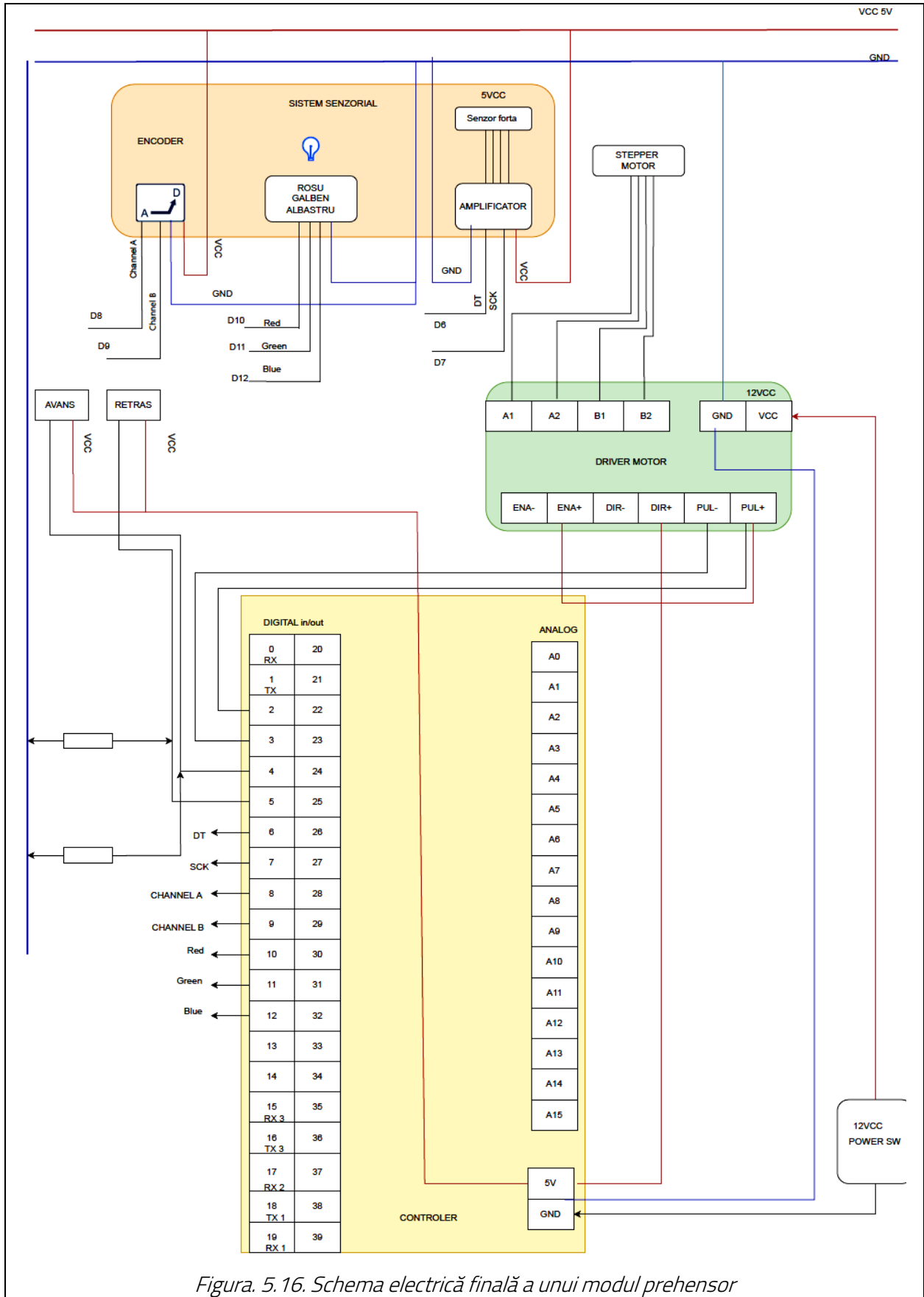


Figura. 5.15. Prehensur autoadaptiv în poziția retrasă

5.8. Proiectarea schemei electronice pe modul, după noua arhitectură



Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

Pentru proiectarea schemei electrice s-a ținut cont de structura logică și de toate părțile electronice implementate pe fiecare modul.

- Motorul pas cu pas cu driverul programabil;
- Encoderul optic incremental;
- Senzorul de forță cu amplificatorul de semnal;
- Controlerul;
- Contactorii de limitare a cursei;



Figura. 5.17. Realizarea fizică a tabloului electric

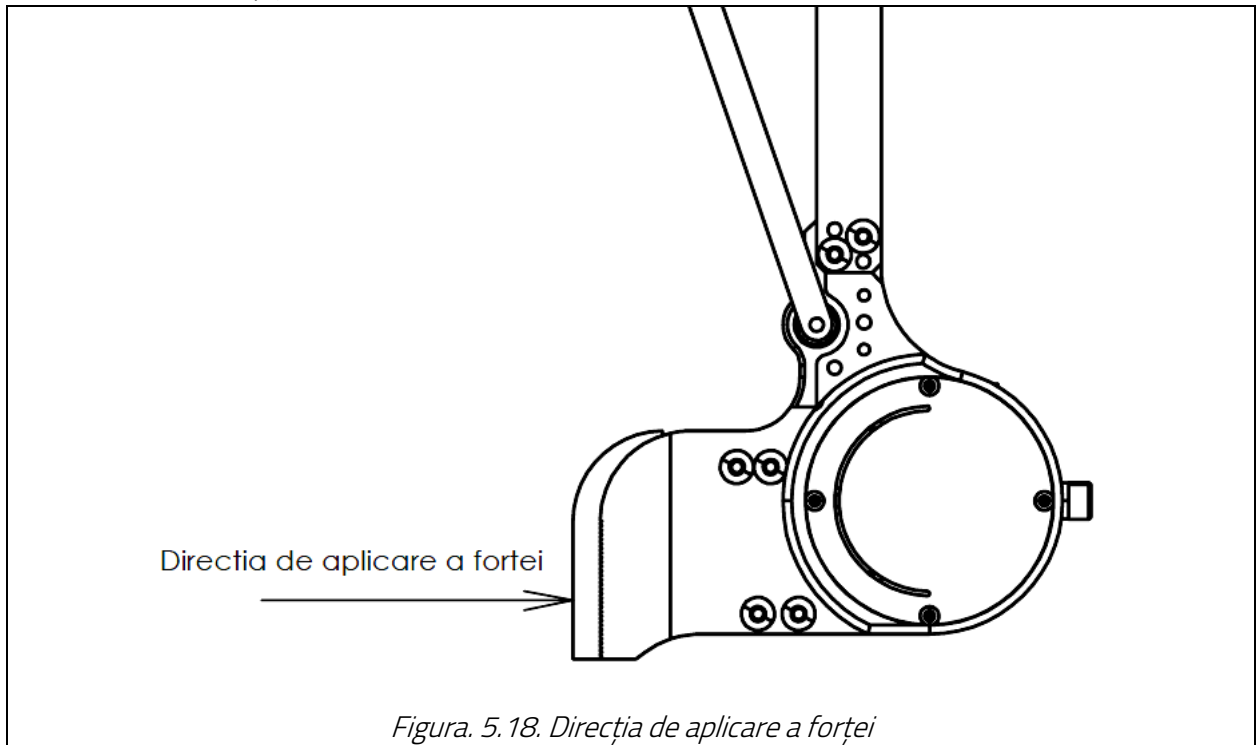
5.9. Determinarea forțelor de strângere în vederea prehensării autoadaptive

Studiul etapelor de parametrizare și calibrare a senzorilor de forță:

Senzorii de forță sunt de tip piezo și este creată o semipunte wiston (folosind doar doi senzori în loc de 4).

Se măsoară valorile generate de fiecare modul în parte în 3 faze (Figura. 5.18):

- Faza 1 – valorile măsurate la liber (aici se poate observa zgomotul/tesiuena mecanică exercitată în sensor);
- Faza 2 – valorile măsurate la atingere (forța este aplicată frontal bacurilor, perpendicular pe celula de forță) conform figurii;
- Faza 3 – valori măsurate la strângere (forța este aplicată frontal bacurilor, perpendicular pe celula de forță).



Pentru a realiza determinările s-a implementat un amplificator de semnal de tip HX711.h și s-a creat un soft pentru măsurarea celulelor de forță în vederea calibrării.

Pașii creați în software pentru realizarea calibrării:

Pasul 1. S-au declarat pinii de comunicație dintre programatorul de tip ATmega și amplificatorul HX711, sub forma unor constante

```
"const int LOADCELL_DOUT_PIN = 6;"
```

```
"const int LOADCELL_SCK_PIN = 7;"
```

Pasul 2. S-a inițializat comunicarea serială și frecvența pe care aceasta lucrează

```
" Serial.begin(9600)"
```

```
"scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN) // Inițializarea scalei HX711"
```

```
" Serial.println("Calibrare...")"
```

```
"Serial.println("In aceasta faza nu trebuie sa existe nici o forta aplicata asupra senzorului.")"
```

```
"scale.tare(); // Resetarea scalei la zero"
```

```
"Serial.println("Calibrare finalizată!")"
```

Pasul 3. S-au introdus comenzile de calibrare a senzorului sub forma:

```
"char temp = Serial.read(); - Citirea caracterului din Serial (util pentru comenzi"
```

```
" if (temp == 't' || temp == 'T')"
```

```
" scale.tare(); // Recalibrarea dacă se trimite 't' sau 'T'"
```

Pasul 4. S-a declarat modul de scalare și modul de afișare a greutății

Tabelul 5.4. Colectarea datelor afișate

Nr	Detalii măsurători
----	--------------------

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

(scaledWeight) > 0.01) - Verificarea dacă greutatea scalată este mai mare decât un prag mic

```
Serial.print("Greutate: ")
```

Serial.print(scaledWeight, 2) - Afișarea greutății scalate cu 2 zecimale

Serial.println(" unități"); - Modul de afișare va fi afișat ca și unități reprezentând greutatea

Pasul 5. Colectarea datele afișate au fost redade în *Tabelul 5.4.*

Toate datele selectate vor fi filtrate și separate pe coloane separate.

S-au colectat datele pentru fiecare modul în parte, ținând cont de cele trei faze specificate anterior.

Rezultatele pentru Modulul Nr1 pe un interval de un minut sunt redade în **Eroare! Fără sursă de referință.** Unitățile măsurate declarate în software pentru determinarea greutății sunt echivalate în grame (1 unitate= 1 g). S-a realizat software-ul final de testare a sensorului de forță.

1	17:56:04.534 -> Greutate: -27.62 unități
2	17:56:05.045 -> Greutate: -18.34 unități
3	17:56:05.557 -> Greutate: -27.65 unități
4	17:56:06.115 -> Greutate: -27.66 unități
5	17:56:06.627 -> Greutate: -27.63 unități
6	17:56:07.182 -> Greutate: -27.74 unități
7	17:56:07.695 -> Greutate: -27.65 unități
8	17:56:08.209 -> Greutate: -18.25 unități
9	17:56:08.720 -> Greutate: -27.67 unități
10	17:56:09.279 -> Greutate: -27.68 unități
11	17:56:09.792 -> Greutate: -18.24 unități
12	17:56:10.305 -> Greutate: -27.65 unități
13	17:56:10.822 -> Greutate: -27.65 unități
14	17:56:11.376 -> Greutate: -18.15 unități
15	17:56:11.884 -> Greutate: -18.09 unități

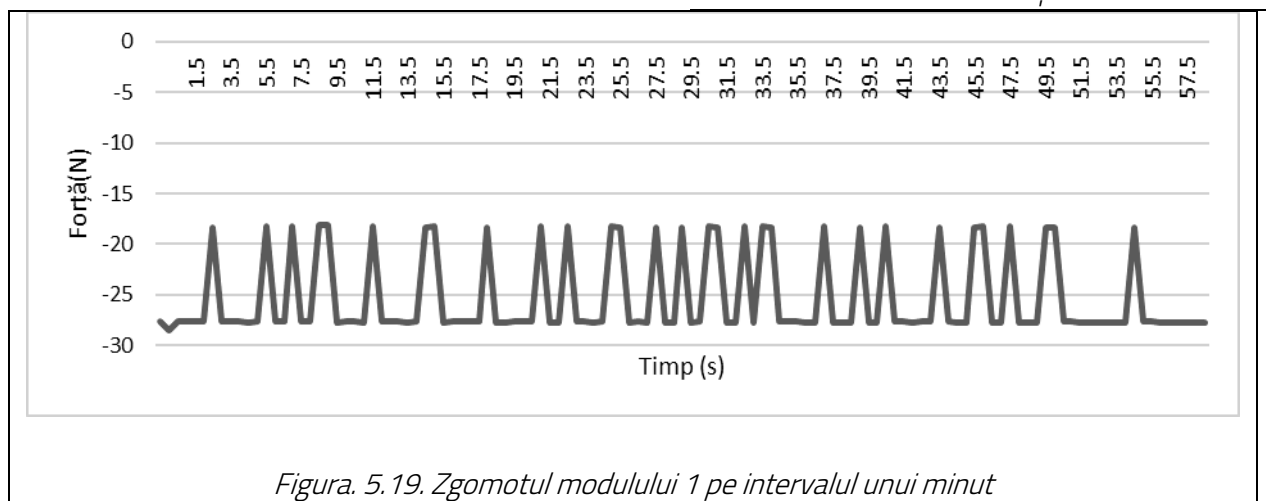
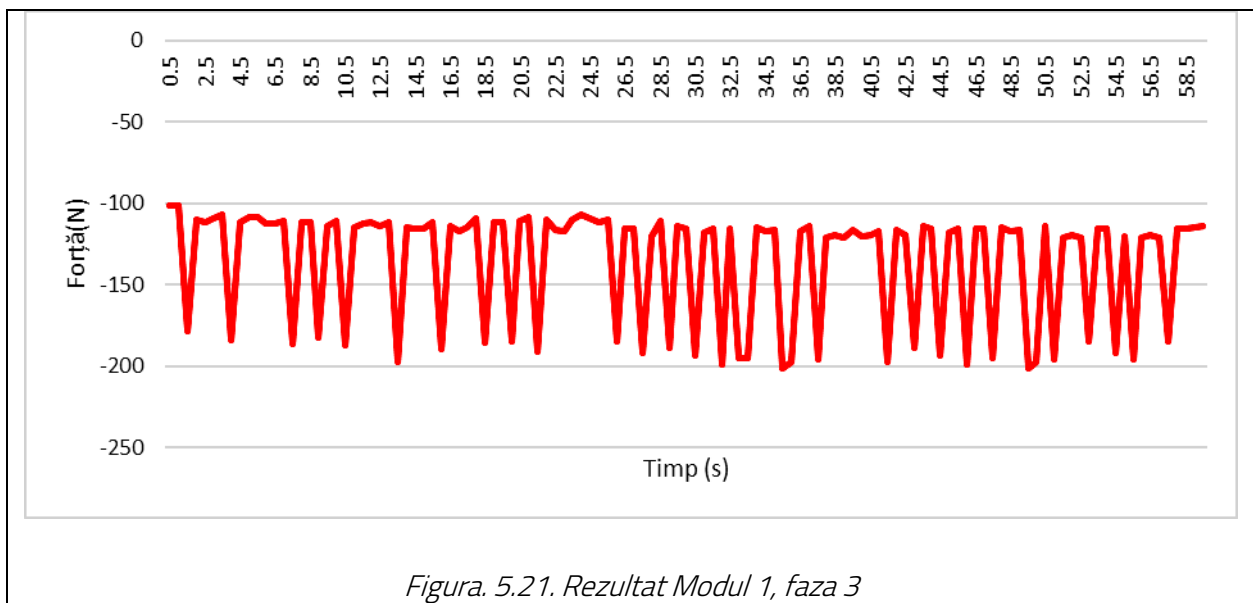
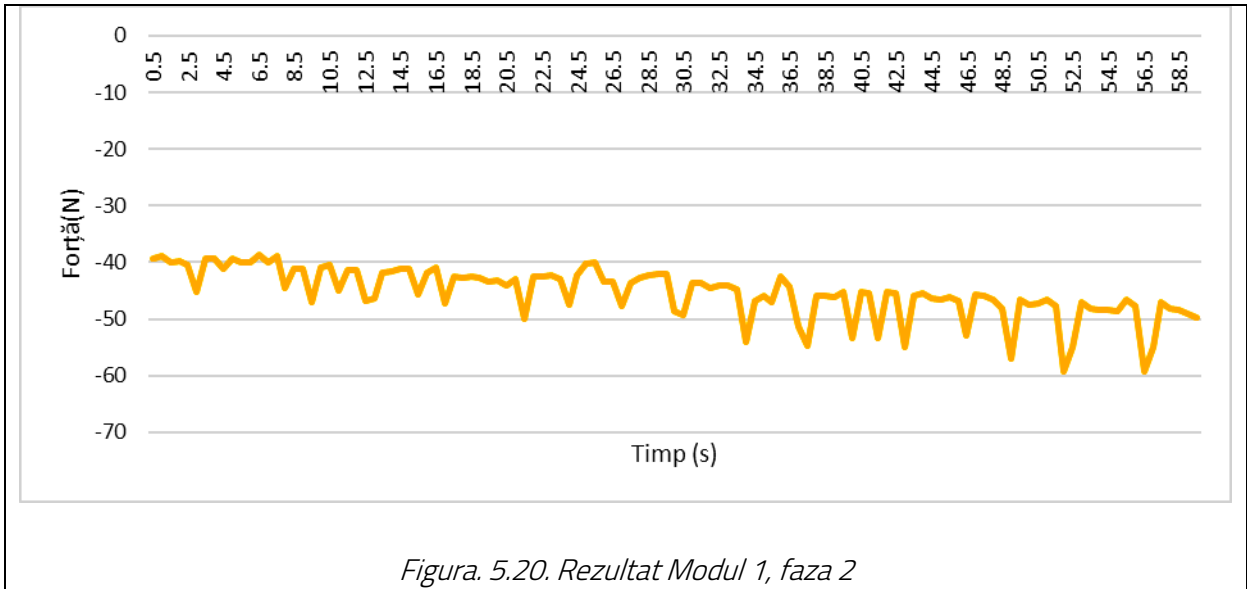


Figura. 5.19. Zgomotul modulului 1 pe intervalul unui minut

După separarea datelor colectate s-a generat graficul din

Figura. 5.19, care reprezintă zgomotul modului 1 pe intervalul unui minut fără a fi influențat cu vreo forță din exterior.



5.10. Determinarea valorilor unghiulare ale senzorului de alunecare în vederea autoadaptivității

a) Realizarea software în scopul determinărilor unghiulare

Pentru determinarea valorilor unghiulare s-a realizat un software dedicat în vederea testării, care a fost instalat pe fiecare modul al prehensorului.

```

1  const int channelA = 8;
2  const int channelB = 9;
3
4  volatile int position = 0;
5  volatile int lastEncoded = 0;
6
7  void setup() {
8      Serial.begin(9600);
9      pinMode(channelA, INPUT);
10     pinMode(channelB, INPUT);
11     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(channelA), updateEncoder, CHANGE);
12     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(channelB), updateEncoder, CHANGE);
13 }
14
15 void loop() {
16     Serial.print("Position: ");
17     Serial.println(position);
18     delay(100);
19 }
20
21 void updateEncoder() {
22     int MSB = digitalRead(channelA);
23     int LSB = digitalRead(channelB);
24
25     int encoded = (MSB << 1) | LSB;
26     int sum = (lastEncoded << 2) | encoded;
27
28     if (sum == 0b1101 || sum == 0b0100 || sum == 0b0010 || sum == 0b1011) position++;
29     if (sum == 0b1110 || sum == 0b0111 || sum == 0b0001 || sum == 0b1000) position--;
30
31     lastEncoded = encoded;
32 }

```

Figura. 5.22. Software pentru testarea variație unghiulare

Fiecare modul al prehsorului are un senzor de alunecare care trebuie parametrizat independent, deoarece fiecare are o eroare proprie, fie electrică, fie mecanică.

b) Implementarea și colectarea valorilor citite

Valorile citite de software se fac 10 / secundă pentru a avea o acuratețe a deplasării unghiulare mult mai mare.

Senzorul de alunecare se pliază pe fluxul logic al sistemului și se va măsura în etapele realizate în schema logică.

Pentru a integra senzorul în cadrul sistemului de senzori, este esențial să se colecteze date în diverse faze ale procesului de prehensiune:

Secvența 1 - Evaluarea erorilor generate de encoder înainte de prehensiune pentru fiecare modul.

Secvența 2 - Măsurarea unghiului realizat de palpatorul sensorului până când obiectul prins atinge suportul.

Secvența 3 - Determinarea valorilor unghiulare care indică alunecarea obiectului prehsat, pentru fiecare modul.

Secvența 4- Determinarea valorilor unghiulare pentru o secvență completă al sensorului de alunecare.

Determinarea erorilor pentru fiecare modul (Secvența 1)

Tabelul 5.5. Generarea erorii sensorului pe un interval de o secundă pentru Modulul 1

Timp (s)	Poziție unghiulară (°)
0	Position: 1
0.1	Position: 1

Tabelul 5.6. Generarea erorii sensorului pe un interval de o secundă pentru Modulul 2

Timp(s)	Poziție unghilară (°)
0	Position: -2
0.1	Position: -2

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

0.2	Position: 1	0.2	Position: -2
0.3	Position: 1	0.3	Position: -2
0.4	Position: 1	0.4	Position: -2
0.5	Position: 1	0.5	Position: -2
0.6	Position: 1	0.6	Position: -2
0.7	Position: 1	0.7	Position: -2
0.8	Position: 1	0.8	Position: -2
0.9	Position: 1	0.9	Position: -2
1	Position: 1		

Tabelul 5.7. Generarea erorii sensorului pe un interval de o secundă pentru Modulul 3

Timp (s)	Poziție unghilară (°)
0	Position: 7
0.1	Position: 7
0.2	Position: 7
0.3	Position: 7
0.4	Position: 7
0.5	Position: 7
0.6	Position: 7
0.7	Position: 7
0.8	Position: 7
0.9	Position: 7

Tabelul 5.8. Generarea erorii sensorului pe un interval de o secundă pentru Modulul 4

Timp(s)	Poziție unghilară (°)
0	Position: -5
0.1	Position: -5
0.2	Position: -5
0.3	Position: -5
0.4	Position: -5
0.5	Position: -5
0.6	Position: -5
0.7	Position: -5
0.8	Position: -5
0.9	Position: -5

Deteminarea unghilară la contact pentru fiecare modul (Secvența 2)

Măsurătorile efectuate de palpatorul sensorului până la stabilirea contactului au fost repetate de mai multe ori pentru același senzor, pentru a defini anumite praguri sub formă de intervale. Simulările au fost realizate pe o perioadă de 30 de secunde.

Simularea contactului pentru Modulul 1 corespunde cu datele graficului din

Figura. 5.23.

Tabelul 5.9. Generarea erorii sensorului pe un interval de o secunda pentru Modulul 5

Timp (s)	Poziție unghilară (°)
0	Position: -1
0.1	Position: -1
0.2	Position: -1
0.3	Position: -1
0.4	Position: -1
0.5	Position: -1
0.6	Position: -1
0.7	Position: -1
0.8	Position: -1
0.9	Position: -1

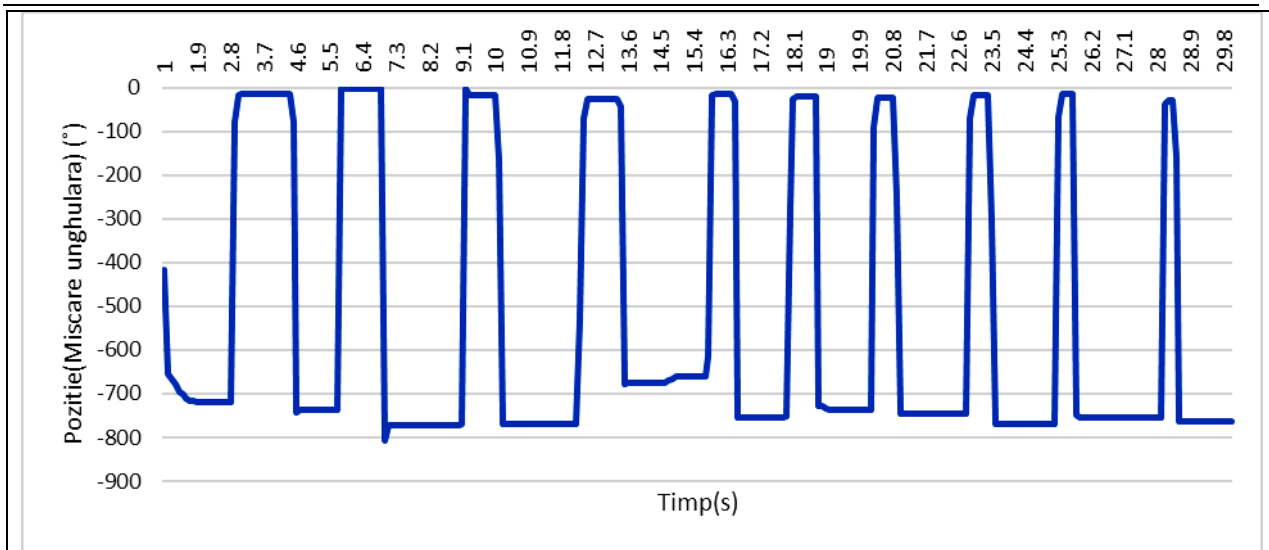


Figura. 5.23. Determinarea unghiulară la contact într-un interval de timp pentru Modulul 1

În acest proces de colectare a datelor s-a repetat contactul de mai multe ori, conform rezultatelor, senzorul 4 generează valori de contact între (600° și 750°), iar la eliberarea lui valorile tind între (0 și -30°).

După cum se poate observa, valorile de contact sunt pozitive comparativ cu valorile generate de ceilalți senzori. Acest aspect nu va influența, deoarece în software vor fi declarate doar valorile pozitive, chiar dacă acestea sunt generate ca măsurători negative.

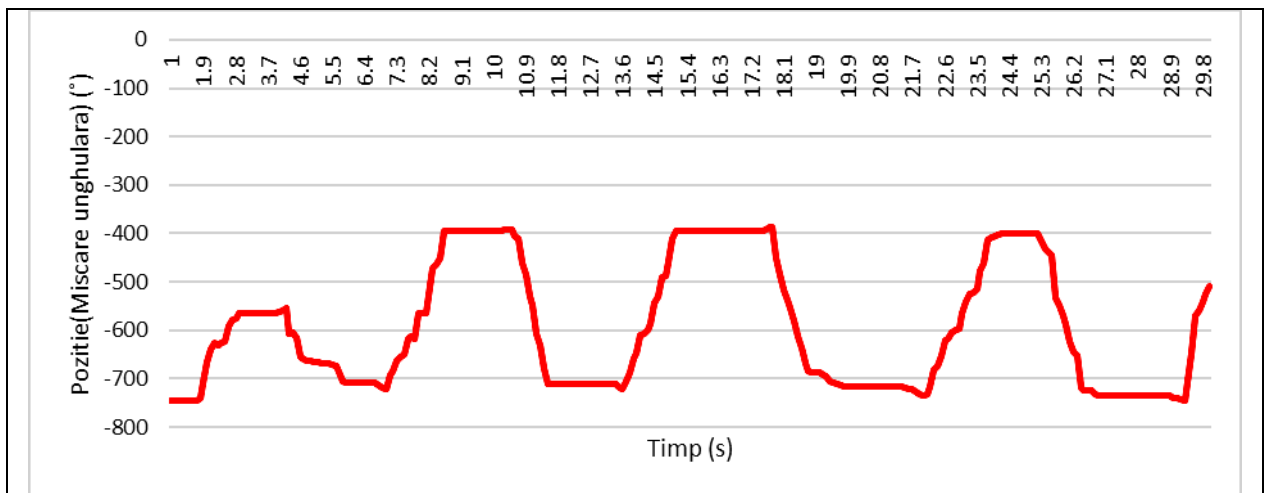


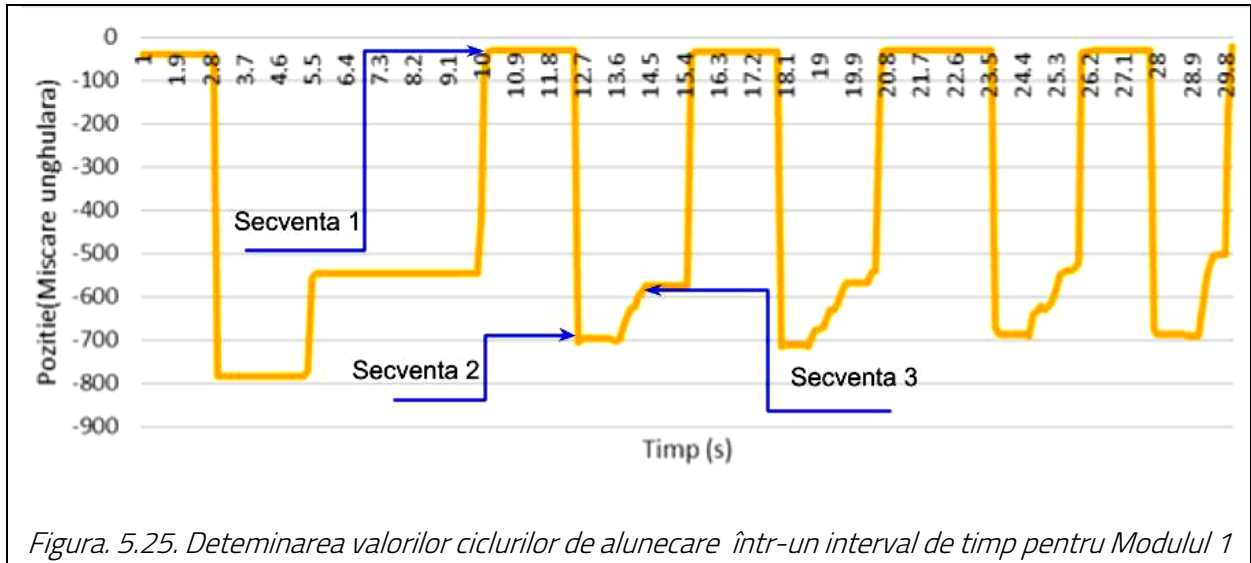
Figura. 5.24. Determinarea unghiulară a alunecării într-un interval de timp pentru Modulul 1

Determinarea valorilor unghiulare pentru o secvență completă a senzorului de alunecare

Pentru determinarea secvențelor complete a senzorului de alunecare s-au realizat cicluri complete realizând cele 3 secvențe (secvența 1, secvența 2 și secvența 3).

Valorile măsurate s-au obținut pe o durată de 30 de secunde, perioadă în care s-au simulat mai multe cicluri complete pentru a stabili un interval specific în care are loc alunecarea pentru fiecare modul al prehensorului

Simularea ciclurilor Modulului 1 corespunde cu datele prezentate în graficul din Figura. 5.25.



Conform datelor colectate se observă cele 3 secvențe la fiecare ciclu realizat, sistemul începe colectarea datelor când senzorul este pe o perioadă scurtă de timp (intervalul s9.8 - s12) în stare liberă urmată de o valoare unghiulară mare (-800°) care reprezintă contactul, în poziția de contact s-a menținut în echilibru o perioadă scurtă de timp (s12.1 – s13.5) după care urmează o scădere unghiulară treptată ce reprezintă alunecarea (s13.5 - s15.3)

5.11. Concluzii

Arhitectura logică a sistemului senzorial este concepută pentru a permite prehensiunea independentă mecanic, electric și software. Implementarea prehensiunii autoadaptative în trei pași asigură o manipulare precisă a obiectelor, evitând alunecarea și deformarea acestora.

Sistemul senzorial implementat în bacul prehensorului autoadaptiv utilizează un encoder rezistiv și o platbandă cu mișcare de translație și rotație pentru detectarea și manipularea obiectelor. Acesta asigură o prehensiune eficientă și sigură, minimizând alunecarea și deformarea obiectelor prehensate.

Testele software ale sistemului senzorial confirmă funcționalitatea corectă a encoderului rezistiv în detectarea poziției și a erorilor mici. Cu toate acestea, rezoluția actuală a encoderului nu este suficient de mare pentru a detecta alunecarea în timp util, sugerând necesitatea unei reproiectări.

Necesitatea unei reproiectări este evidentă pentru a îmbunătăți precizia și eficiența sistemului senzorial în detectarea alunecării și manipularea obiectelor. Implementarea unui encoder incremental optic cu rezoluție mare și optimizarea mecanismului de translație și rotație sunt recomandate pentru a îmbunătăți performanța și fiabilitatea sistemului.

Proiectarea prehensorului robotic avansat s-a concentrat pe integrarea unui senzor de alunecare pentru a îmbunătăți capacitatea de prindere și manipulare a obiectelor, evidențiind importanța optimizării geometrice și a materialelor pentru performanță și durabilitate.

Implementarea și testarea prehensorului robotic avansat au demonstrat eficiența și funcționalitatea sa în condiții reale, confirmând capacitatea sa de a se adapta și de a efectua operațiuni precise în diverse aplicații industriale și de manipulare a obiectelor.

6. DEZVOLTAREA ȘI REALIZAREA ADAPTIVITĂȚII PREHENSORULUI

Obiectivul propus în acest capitol a fost dezvoltarea și implementarea unui prehensor autoadaptabil, bazat pe o arhitectură modulară și o structură de comunicare eficientă, pentru realizarea prehensiunii diverselor obiecte într-un mod controlat și sincronizat.

6.1. Dezvoltarea arhitecturii logice a sistemului de prehensiune în vederea realizării autoadaptivității

Pentru realizarea autoadaptivității prehensurului este necesar controlul fiecărui modul al prehensurului independent și în acest scop fiecare modul are propriul controller ce realizează prehensiunea independent de celelalte module. Acest lucru ajută în controlul și decizia în procese mult mai rapid.

Având 5 controlere pentru fiecare modul s-a implementat al șaselea controller care s-a setat ca fiind controller Master, iar celelalte cinci setate ca Slave (Figura. 6.1).

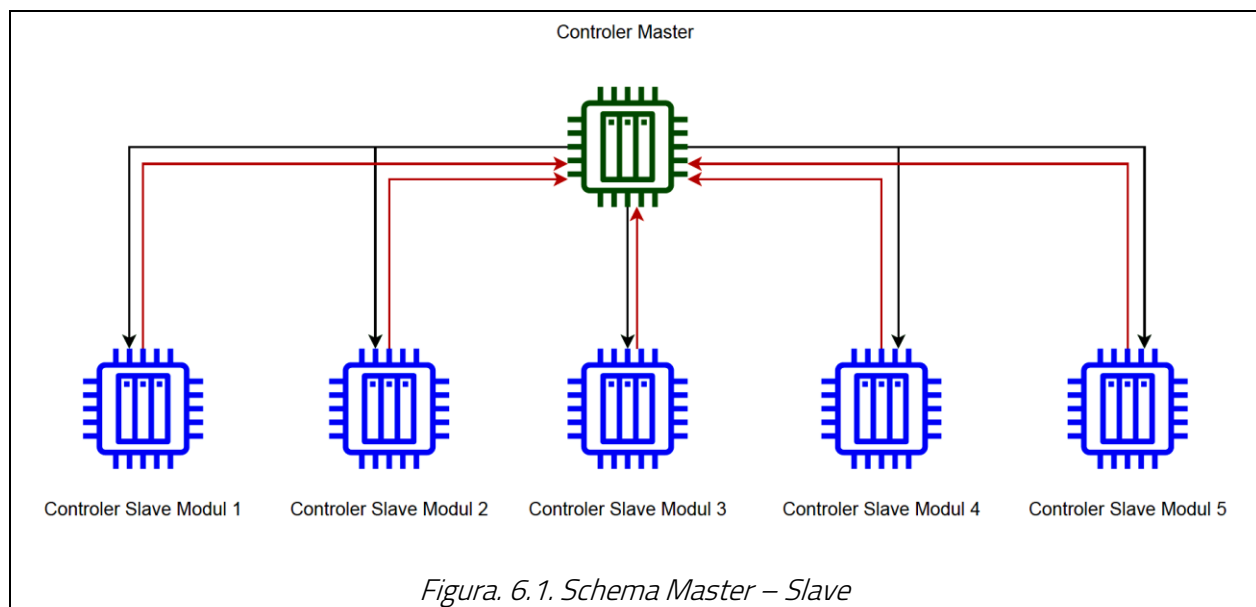


Figura. 6.1. Schema Master – Slave

6.2. Realizarea structurii de comunicație Mastre to Slave

Structura de comunicație Master-Slave (Figura. 6.2) a fost implementată astfel încât controlerul Master să execute comenzi simultan către slave-uri. Acesta colectează date referitoare la prehensiunea obiectelor de la fiecare modul, luând decizii privind momentul și necesitatea reactivării proceselor de prehensiune pentru fiecare modul în parte.

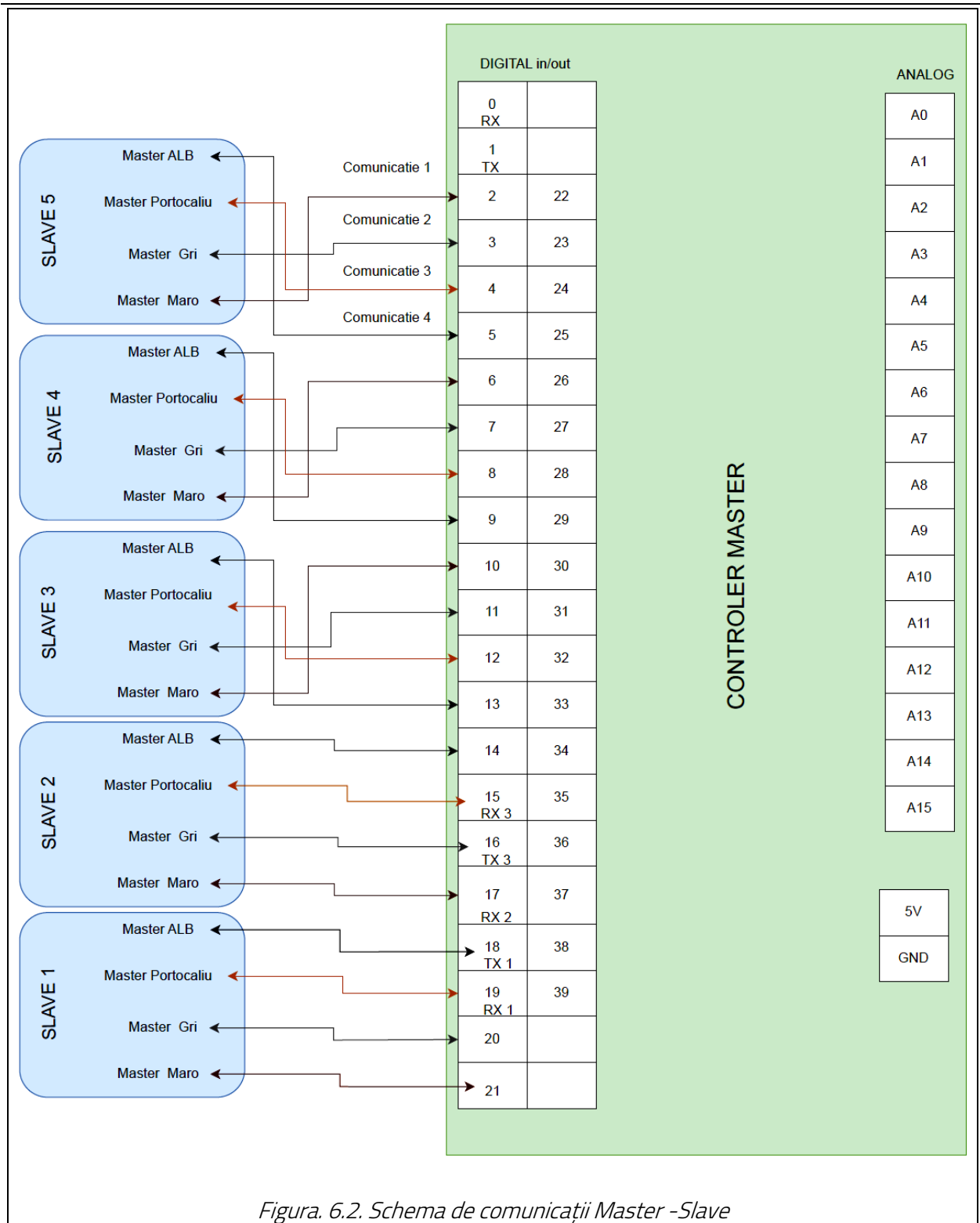
6.3. Structura logică a comunicație binare Master to Slave

Pe comunicațiile declarate conform codul culorilor, pe fiecare dintre acestea se pot trimite sau se pot primi informații logice referitoare la prehensiune.

Comunicația logică este următoarea:

Comunicație 1 (Modul1) – dacă este 1logic – Modulul este în poziția de avans;

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate



Toate modulele vor avea comunicațiile identice cu controlerul master, dar pe alte porturi digitale.

Controlerul master, înainte de prehensare, solicită statusul actual al modulelor pentru a decide dacă se face prehensarea sau dacă este necesar re poziționare pentru o prehensare nouă.

Structura logică pentru pregătire de prehensare este redată în *Tabelul 6.1*, atunci controlerul Master trimite comanda de prehensare (*Tabelul 6.2*).

Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate

Tabelul 6.1. Logica care arată poziția modulelor de avans

Nr. Modul	Comunicație 1 IN	Comunicație 2 IN	Comunicație 3 IN
1	1	0	0
2	1	0	0
3	1	0	0
4	1	0	0
5	1	0	0

Tabelul 6.2. Comanda logică de STAR prehensare

Comunicație 4 OUT
1
1
1
1
1

În situația în care controlerul Master cere statusul de la controlerle Slave și statusul este de natura următoare (Tabelul 6.3), atunci trimite comanda logică de re poziționare (1) pentru Modulul 2 (Tabelul 6.4).

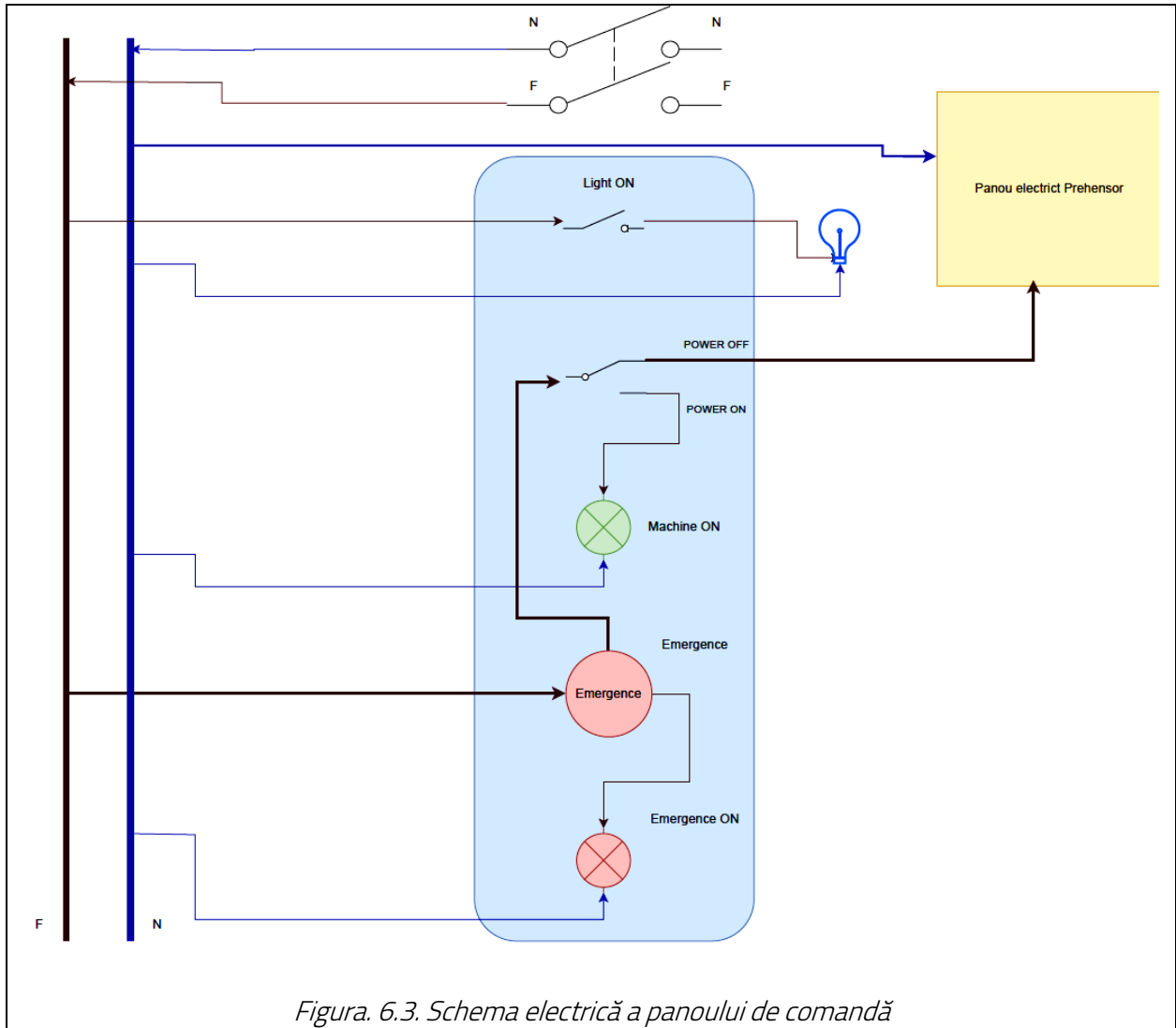
Tabelul 6.3. Logica care arată poziția modulelor de avans mai puțin Modul 2

Nr Modul	Comunicație 1 IN	Comunicație 2 IN	Comunicație 3 IN
1	1	0	0
2	0	0	0
3	1	0	0
4	1	0	0
5	1	0	0

Tabelul 6.4. Comanda logică de re poziționare pentru Modulul 2

Comunicație 4 OUT
0
1
0
0
0

6.4. Proiectarea și execuția schemei panoului de comandă



6.5. Dezvoltarea software a prehensorului în vederea autoadaptivității

Această dezvoltare conține 3 elemente software:

- Dezvoltarea software pentru fiecare modul al prehensorului, acest software se încarcă pe fiecare controller;
- Dezvoltarea software pe controlul Master, este conceput să gestioneze modulele conform structurii logice;
- Dezvoltare aplicație software de tip interfață.

6.5.1. Configurația comunicațiilor digitale a controler-ului

- Motor Pas cu pas
- Driver motor
- Senzor de forță
- Senzor optic incremental
- Led RGB pentru confirmare vizuală.

Configurația conexiunilor este următoarea:

Driverul este atașat la pinul digital 9 pentru PulPin+ și la pinul digital 8 pentru DIRPin+.

Liniile Pul-, Ena- și Dir- sunt conectate la GND.

Switch-urile sunt legate astfel: switch-ul de avans la pinul digital 5 și switch-ul de retragere la pinul digital 4.

Encoderul este conectat cu canalul A la pinul digital 2 și canalul B la pinul digital 3.

Senzorul de forță este conectat cu DT la pinul digital 6 și SCK la pinul digital 7.

LED-ul RGB este conectat cu Roșu la pinul digital 10, Verde la pinul digital 11 și Albastru la pinul digital 12.

Un buton de start/stop pentru secvența de prehensare este conectat la pinul digital 17.

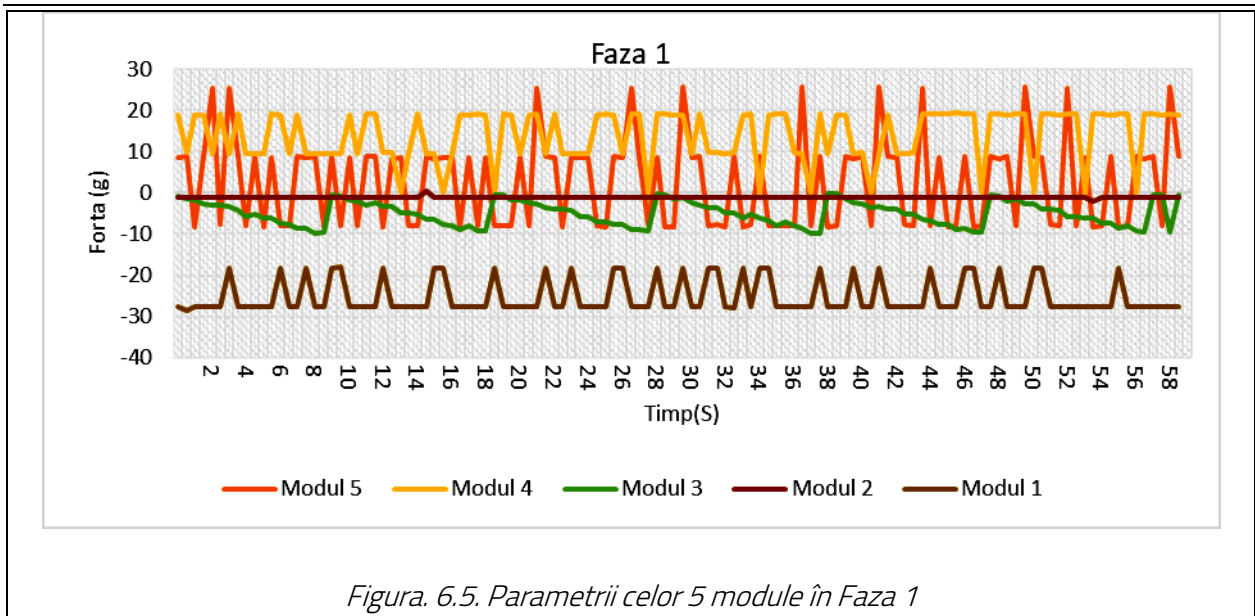
```
1  #include <Stepper.h>
2
3  | const int stepsPerRevolution = 200;
4
5  |
6  Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 9, 8); // Pini pentru PUL+ și DIR+
7
8  const int switchAvans = 5;
9  const int switchRetras = 4;
10 const int pinEncoderA = 2;
11 const int pinEncoderB = 3;
12 const int pinDT = 6;
13 const int pinSCK = 7;
14 const int buttonStartStop = 17;
15
16 const int redPin = 10;
17 const int greenPin = 11;
18 const int bluePin = 12;
19
20 volatile int encoderValue = 0;
21 volatile int lastEncoded = 0;
22
23 void setup() {
24     pinMode(switchAvans, INPUT);
25     pinMode(switchRetras, INPUT);
26     pinMode(pinEncoderA, INPUT);
27     pinMode(pinEncoderB, INPUT);
28     pinMode(pinDT, INPUT);
29     pinMode(pinSCK, OUTPUT);
30     pinMode(buttonStartStop, INPUT);
31     pinMode(redPin, OUTPUT);
32     pinMode(greenPin, OUTPUT);
33     pinMode(bluePin, OUTPUT);
```

Figura. 6.4. Declararea componentelor electronice în software

6.5.2. Stabilirea parametrilor senzoriali

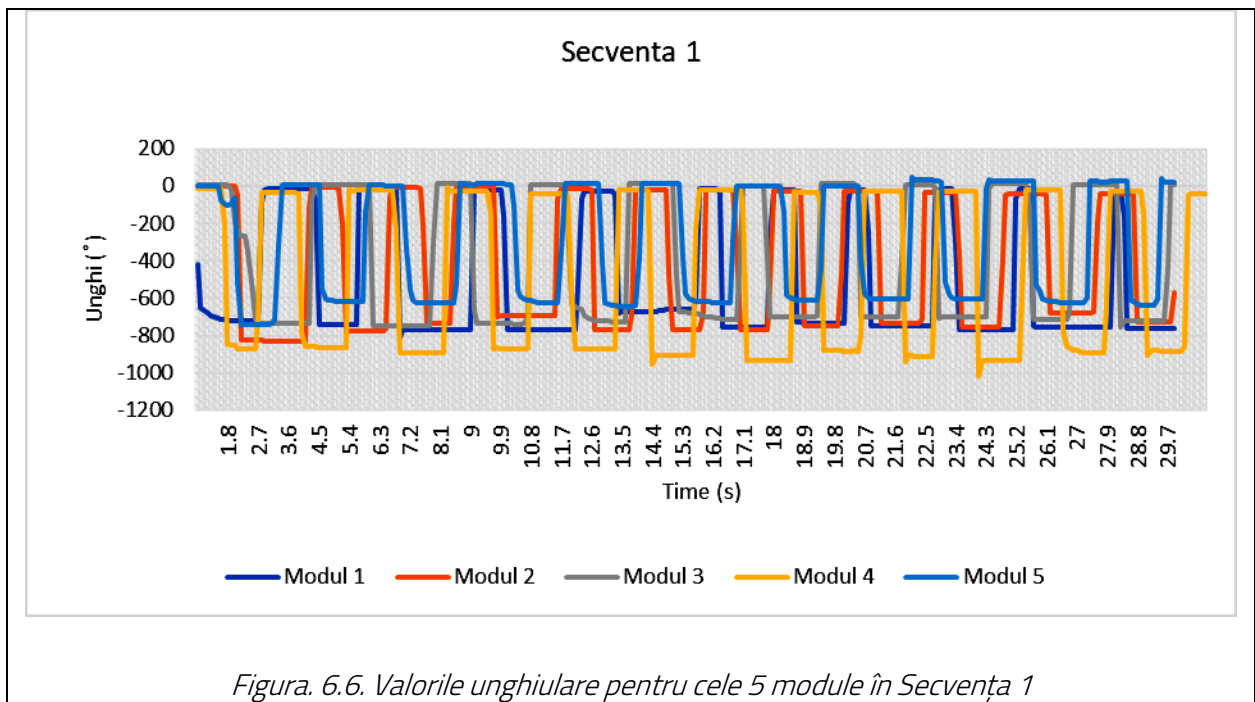
Determinarea parametrilor comuni ai senzorilor de forță pentru cele trei faze de prehensare.

Determinarea valorilor Fazei 1 (Figura. 6.5). Valorile comune declarate în software pentru Faza 1 sunt cuprinse în intervalul -35 și +30 de unități.



Determinarea valorilor unghiulare aferente Secvenței 1 (Figura. 6.6):

Valorile unghiulare comune declarate în software pentru Secvența 1 (secvența de contact) sunt cuprinse în intervalul -550 și -900 de unitați.



6.5.3. Realizarea software-ului autoadaptiv

În această etapă s-a dezvoltat și implementat un program care să gestioneze următoarele operațiuni și condiții conform arhitecturii logice, ținând cont de valorile senzorilor colectate anterior:

Condiția 1:

Aceasta este o etapă de inițializare.

1. Dacă butonul digital 17 este dezactivat (egal cu 0), motorul va retrograda până când switch-ul de retragere este activat.
2. Dacă butonul digital 17 este activat, se va iniția acțiunea de prehensare:

```

42 void loop() {
43     if (digitalRead(buttonStartStop) == HIGH) {
44         prehensare();
45     } else {
46         retragere();
47     }
48 }

```

Figura. 6.7. Cod de inițializare

Condiția 2:

Motorul pas cu pas va avansa până când switch-ul de avans este activat și se va retrage până când switch-ul de retragere este activat. Această funcție este una de siguranță în vederea protejării structurii mecanice.

```

49 if (forwardState == HIGH) {
50     digitalWrite(DIRPin, HIGH); // Setează direcția înainte
51     continuousStep();
52 } else if (backwardState == HIGH) {
53     digitalWrite(DIRPin, LOW); // Setează direcția înapoi
54     continuousStep();
55 } else {
56     stopMotor();
57 }

```

Figura. 6.8. Funcția de siguranță

Condiția 3:

Management Led

1. Atâta timp cât senzorul de forță nu înregistrează valori între +30 și -30, LED-ul va fi albastru.
2. Atâta timp cât timp encoderul nu depășește valorile unghiulare de +20 și -20, LED-ul va rămâne albastru.

```

113 void manageLED(int force, int encoder) {
114     if (force > 30 || force < -30 || encoder > 20 || encoder < -20) {
115         setColor(0, 0, 255); // Setează LED-ul pe albastru dacă forța sau unghiul sunt în limite
116     } else if (force >= 200 && force < 300) {
117         setColor(255, 0, 0); // Setează LED-ul pe roșu dacă forța este între -200 și -300
118     } else if (force >= 300 && force < 400) {
119         setColor(255, 0, 0); // Setează LED-ul pe roșu dacă forța este între -300 și -400
120     } else if (force >= 400) {
121         setColor(0, 255, 0); // Setează LED-ul pe verde dacă forța este stabilă la -400
122     }
123 }

```

Figura. 6.9. Funcțiile de management led

3. Dacă valorile rămân stabile de la encoder (nu fluctuează mai mult de 10 unități după etapa de strângere), LED-ul va deveni verde.
4. Dacă după strângere, valoarea encoderului depășește cele 10 unități (reprezintă alunecare), LED-ul va deveni roșu în această perioadă și va redeveni verde dacă valoarea se stabilizează și encoderul nu indică o scădere suplimentară.

```

84 // Continuă să adaugi codul pentru gestionarea acțiunilor descrise
85 void prehensare() {
86 // Verifică switch-ul de avans și deplasează motorul în direcția de avans
87 while (!digitalRead(switchAvans) && digitalRead(buttonStartStop) == HIGH) {
88 myStepper.step(1); // Avansează motorul cu un pas
89 int force = analogRead(pinDT); // Citește valoarea senzorului de forță
90 manageLED(force, encoderValue); // Actualizează starea LED-ului
91
92 if (encoderValue >= -950 && encoderValue <= -550) {
93 break; // Întrerupe bucla dacă encoderul ajunge în intervalul dorit
94 }
95 }
96
97 // Verifică valoarea forței și ajustează dacă este necesar
98 while (analogRead(pinDT) < 200) {
99 myStepper.step(1); // Continuă să avansezi motorul
100 int force = analogRead(pinDT);
101 manageLED(force, encoderValue); // Actualizează starea LED-ului
102 }
103 }
104
105 void retragere() {
106 while (!digitalRead(switchRetras) && digitalRead(buttonStartStop) == LOW) {
107 myStepper.step(-1); // Retrage motorul cu un pas
108 int force = analogRead(pinDT); // Citește valoarea senzorului de forță
109 manageLED(force, encoderValue); // Actualizează starea LED-ului
110 }
111 }

```

Figura. 6.10. Funcția de prehensare și implementarea valorile senzorilor

Condiția 4:

Prehensare

1. Motorul va avansa până când encoderul înregistrează valori unghiulare între -550 și -950. Odată atinsă această valoare, motorul va continua să avanseze până când senzorul de forță atinge valoarea de -200.
2. Dacă valoarea senzorului de forță scade mai mult de 20 unități de la -200, motorul va continua să avanseze până când senzorul indică -300.
3. Dacă valoarea senzorului de forță scade din nou mai mult de 20 unități de la -300, motorul va continua să avanseze până când senzorul indică -400.
4. Dacă în orice moment al procesului butonul de pe digital 17 devine 0, motorul va retrograda până când switch-ul de retragere este activat.

6.5.4. Dezvoltarea aplicației Android pentru interfațarea panoului de comandă

Pentru a putea comunica și controla sistemul de prehensiune este necesar un panou de control, unde se poate comuta modul de funcționare (manual, automat și reset). În lipsa panoului de comandă s-a creat o aplicație Android ce comunică cu modulul Bluetooth implementat în panoul electric de test al prehsorului adaptiv.

Pentru a crea o aplicație ce utilizează sistemul de comunicație intern al dispozitivului (telefon, tabletă, etc.) este necesară o funcție ce face apel la librăria de programare internă (Figura. 6.11) [39].

```
when ListPicker1 .BeforePicking  
do set ListPicker1 . Elements to BluetoothClient1 . AddressesAndNames
```

Figura. 6.11. Funcție de implementare Bluetooth

După ce funcția de implementare Bluetooth a fost declarată este necesar să se stabilească conexiunea cu modulul Bluetooth al prehsorului. Pentru realizarea conexiunii este implementată o funcție de căutare a dispozitivului și un buton de declanșare a căutării (Figura. 6.12).

```
when ListPicker1 .AfterPicking  
do set ListPicker1 . Selection to call BluetoothClient1 .Connect  
address ListPicker1 . Selection  
set ListPicker1 . Text to "CONNECTED"
```

Figura. 6.12. Funcție de căutare Bluetooth

Comenzile transmise către controler pe (serialRead) sunt de tip numeric sau alfanumeric, iar fiecare cifră implementată în funcție este transmisă către controler. Pentru a putea transmite (0) este necesar un buton pentru a genera acest „cod” (Figura. 6.12).

După finalizarea funcțiilor care generează „coduri” de comandă, acestea pot fi accesate cu o interfață Android ce conține butoanele și explicațiile acestora.



Figura. 6.13. Obiect 1 cu formă neregulată



Figura. 6.14. Obiect 2 cu formă neregulată



Figura. 6.15. Obiect 3 cu formă neregulată

Comanda „PREHENSOR” este utilizată pentru căutarea dispozitivelor Bluetooth, urmată de selectarea dispozitivului dorit.

În această interfață nu există acces la codul din spatele ei, unde sunt funcțiile ce trimit caractere către prehensor (Figura. 6.16).

6.6. Simularea reală a autoadaptivității

Pentru testarea și simularea reală a autoadaptivității s-au luat mai multe obiecte solide cu forme neregulate și s-a testat autoadaptivitatea prehensorului.

În Figura. 6.13 este redat obiectul cu numărul 1 în vederea simulării reale a autoadaptivității. Obiectul a fost ținut cu mâna până când prehensorul a realizat prehensarea obiectului, în Figura. 6.17 fiind redată poziția de prindere a acestuia.

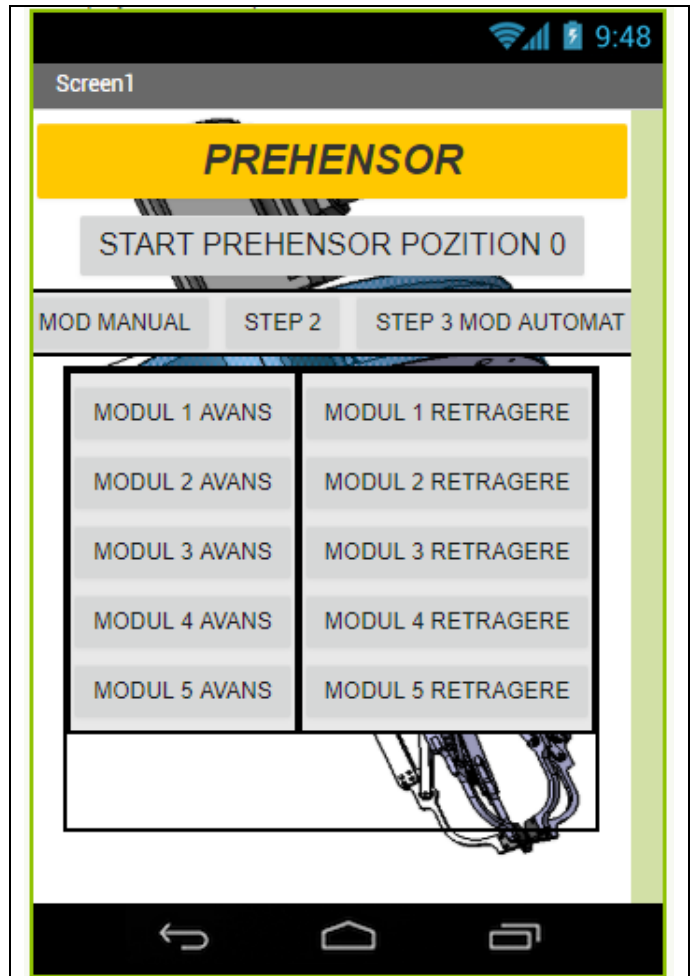


Figura. 6.16. Interfața Android

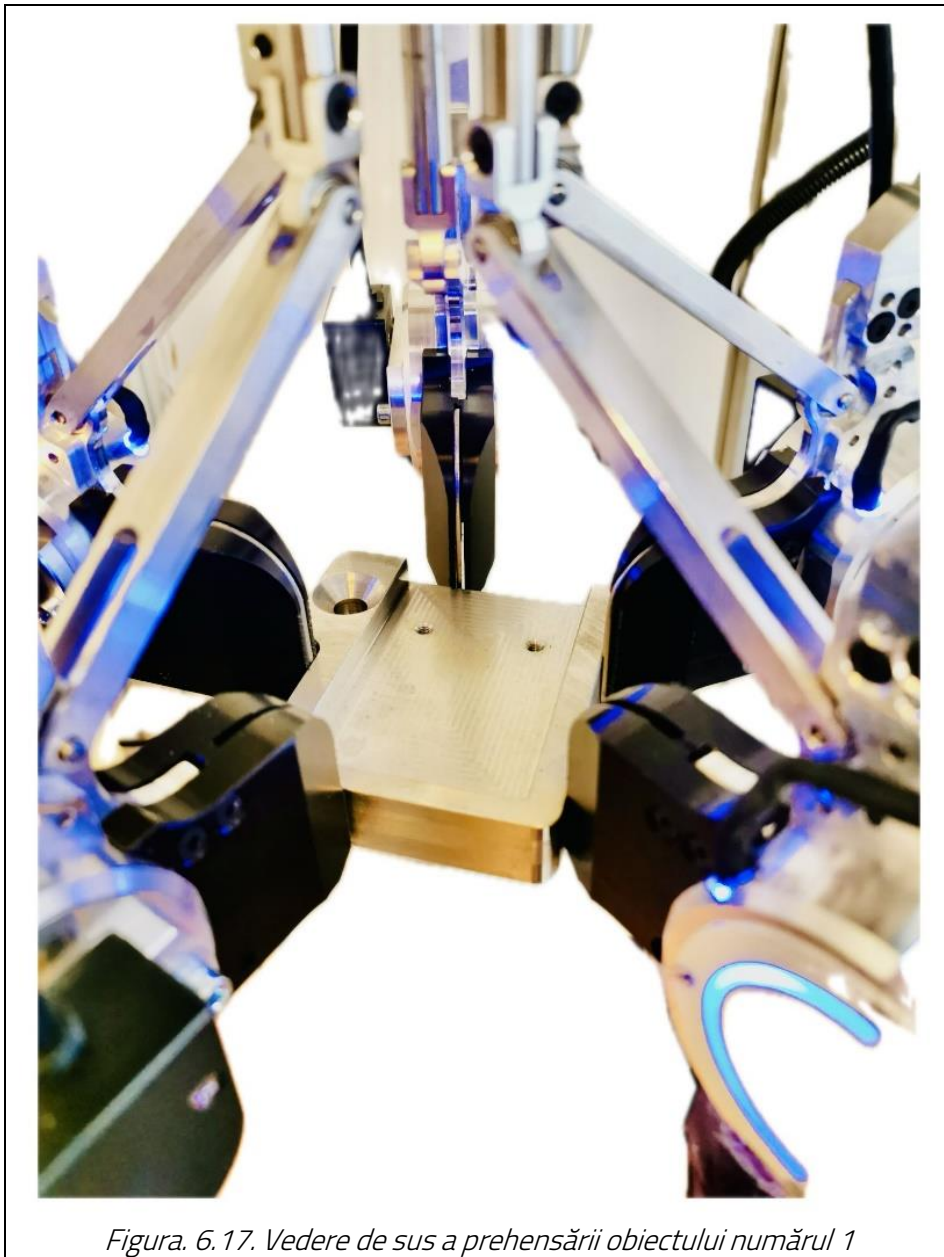


Figura. 6.17. Vedere de sus a prehensării obiectului numărul 1

În Figura. 6.14 este redat obiectul cu numărul 2 în vederea simulării reale a autoadaptivității. Obiectul a fost ținut cu mâna până când preensorul a realizat prehensarea obiectului, în Figura. 6.18 fiind redată poziția de prindere a acestuia.

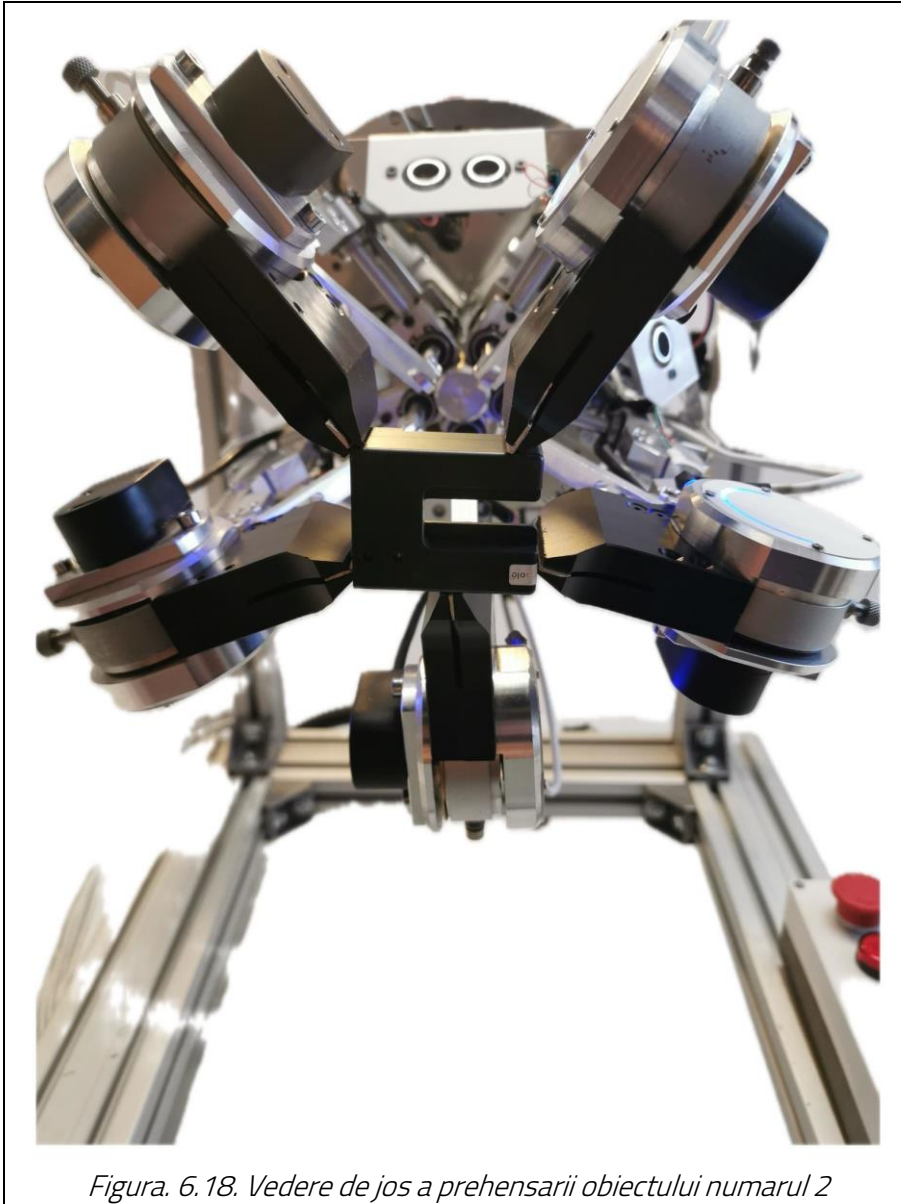


Figura. 6.18. Vedere de jos a prehensarii obiectului numarul 2

În Figura. 6.15 este redat obiectul cu numarul 3 în vederea simulării reale a autoadaptivității. Obiectul a fost ținut cu mâna până când prehensorul a realizat prehensarea obiectului, în

Figura. 6.19 și *Figura. 6.20* fiind redată pozițiile de prindere a acestuia.

6.7. Concluzii

Prehensiunea a fost efectuată cu succes, fiecare modul al prehensorului funcționând independent și corect.

Este necesară optimizarea fiecărui modul individual, proces care presupune ajustări ale software-ului specific fiecărui modul, în funcție de datele provenite de la senzorii săi. Această optimizare va contribui la îmbunătățirea procesului de prehensiune.

Toate testele au fost efectuate fără ca prehensorul să execute mișcări suplimentare care să introducă forțe inerțiale asupra obiectului sau modulelor.

Crearea unei arhitecturi logice bine definită, cu controlere independente pentru fiecare modul al prehensorului, a facilitat implementarea autoadaptivității. Controlul individual al modulelor și deciziile rapide luate de controllerul Master au contribuit la adaptabilitatea și fiabilitatea prehensorului în diverse condiții de prehensiune.

Implementarea unei structuri de comunicare eficiente între controllerul Master și modulele Slave a permis o coordonare precisă și sincronizată a procesului de prehensiune. Capacitatea de a transmite comenzi simultane și de a colecta date esențiale despre starea fiecărui modul a contribuit semnificativ la performanța globală a prehensorului.

Implementarea unei scheme Master-Slave în comunicarea prehensorului permite controlul centralizat al prehensiunii, asigurând gestionarea eficientă a fiecărui modul în funcție de starea și cerințele sale specifice. Această structură logică facilitează deciziile rapide și precise în timpul proceselor de prehensiune, contribuind la adaptabilitatea și eficiența sistemului.

Proiectarea și implementarea schemei panoului de comandă au facilitat controlul precis al prehensorului, inclusiv inițierea, monitorizarea și ajustarea prehensiunii în funcție de cerințele fiecărui obiect. Această integrare electrică și software a asigurat o interacțiune eficientă între operator și sistemul de prehensiune, contribuind semnificativ la realizarea obiectivelor de adaptabilitate și funcționare corectă a prehensorului.

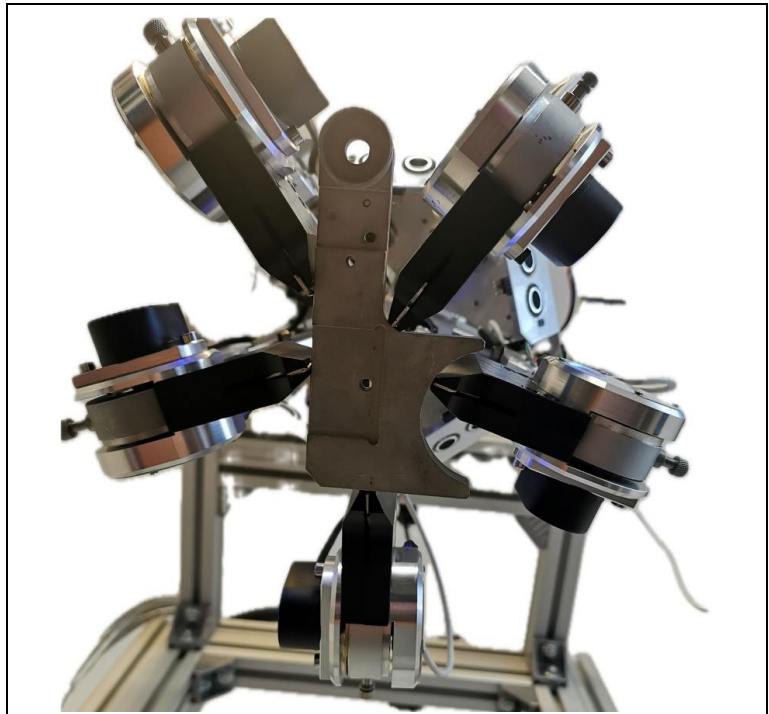


Figura. 6.19. Vedere de jos a prehensării obiectului numărul

3

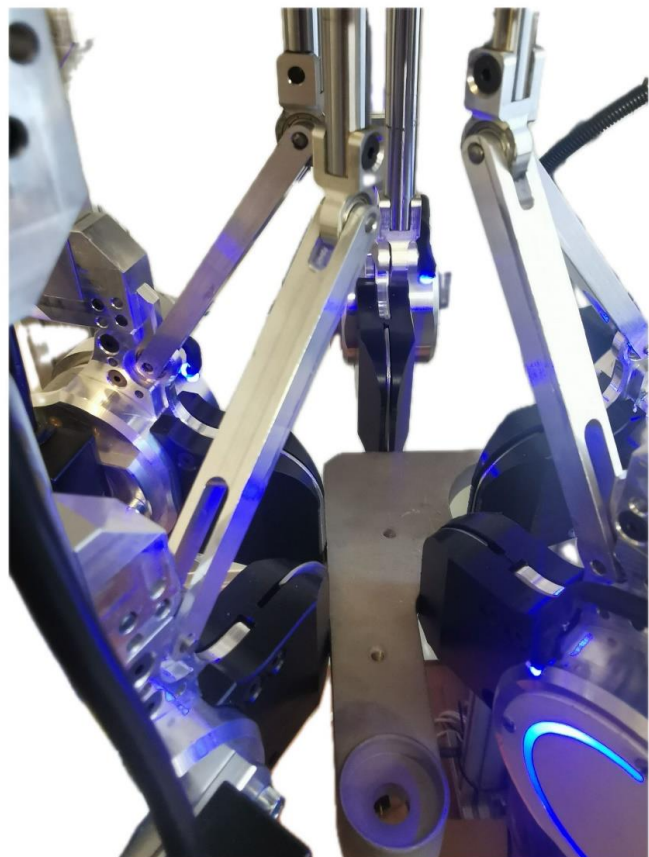


Figura. 6.20. Vedere de sus a prehensării obiectului numărul

3

7. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

7.1. Concluzii generale

În cazul tezei de doctorat intitulată „Sistem de prehensiune autoadaptiv pentru piese solide cu forme neregulate”, s-au prezentat studii desfășurate de autor, cu privire la:

1. Metodele fundamentale de analiză utilizate în robotică au evidențiat importanța modelelor matematice și a simulărilor pentru proiectarea și evaluarea sistemelor robotice. Integrarea acestor metode a permis optimizarea performanței și fiabilității prehensorului pentru o varietate de aplicații.
2. Tehnologiile și strategiile de percepție utilizate în robotică au subliniat rolul esențial al senzorilor în colectarea și interpretarea datelor. Integrarea sistemelor de percepție avansate a contribuit semnificativ la autonomia și capacitatea de adaptare a prehensorului pentru diverse contexte operaționale.
3. Tehnicile și algoritmi avansați de control utilizați în robotică au evidențiat importanța implementării sistemelor precise și eficiente pentru manipularea și navigarea roboților într-un mod sigur și eficient. Integrarea acestor metode a permis optimizarea performanței și adaptabilității prehensorului în aplicații complexe.
4. Tehnologiile și strategiile utilizate pentru manipularea avansată în robotică au evidențiat evoluția și aplicabilitatea soluțiilor pentru manipularea precisă a obiectelor în medii variate. Implementarea acestor tehnici a îmbunătățit eficiența și flexibilitatea operațională a sistemului de prehensare în aplicații industriale și de cercetare.
5. Conceptele și aplicațiile realizate în vederea prehensiunii obiectelor s-au concentrat pe proiectarea, implementarea și evaluarea prehensoarelor pentru manipularea obiectelor complexe în contexte industriale. Integrarea soluțiilor inovative în prehensiunea robotică a contribuit semnificativ la creșterea eficienței și fiabilității operaționale .

7.2. Contribuții personale

- 1) S-au studiat sisteme de prehensiune existente în industrie la nivel global.
- 2) S-au cercetat tipuri de senzori utilizați la sistemele de prehensiune și s-a concluzionat că cei mai utilizați sunt senzori de forță, proximitate, encoder pentru verificarea deplasărilor.
- 3) S-a elaborat o configurație cinematică inovatoare pentru prehensorul cu cinci degete independente, bazată pe o arhitectură de tip paralelogram, care oferă flexibilitate și precizie în mișcările prehensorului.
- 4) S-a dezvoltat un set de algoritmi pentru controlul mișcărilor prehensorului, asigurându-se că acesta poate adapta rapid și precis pozițiile degetelor pentru a manipula obiecte de diverse forme și dimensiuni.
- 5) S-a realizat modelarea 3D detaliată a prehensorului utilizând ca software CAD Catia, integrând configurația cinematică propusă, pentru a asigura acuratețea geometrică și funcționalitatea acestuia.
- 6) S-au implementat și testat diferite materiale ale modelului 3D, pentru a identifica soluțiile optime care oferă durabilitate și performanță ridicată în utilizarea prehensorului.
- 7) S-au realizat simulări cinematice pentru a evalua performanțele dinamice ale prehensorului, ajustând design-ul în funcție de rezultatele obținute pentru a îmbunătăți adaptabilitatea și precizia mișcărilor.

- 8) S-a efectuat o analiză structurală detaliată folosind software de analiză prin elemente finite (FEA), evaluând rezistența și durabilitatea prehensorului sub diferite condiții de încărcare și utilizare.
- 9) S-a proiectat și analizat modularitatea prehensorului, asigurându-se că fiecare modul poate funcționa independent și asamblat, fără a afecta restul sistemului.
- 10) S-au realizat simulări avansate pentru a evalua rezistența și durabilitatea componentelor prehensorului în diverse scenarii de manipulare a obiectelor.
- 11) S-a dezvoltat și implementat un algoritm avansat de recunoaștere a formei obiectului, folosit pentru a determina automat modul de prehensiune optim în funcție de geometria și dimensiunile obiectului.
- 12) S-au propus și implementat strategii de control adaptative care permit prehensorului să ajusteze automat presiunea și poziționarea degetelor de prehensiune în funcție de caracteristicile obiectului detectat.
- 13) S-a optimizat schema electrică pentru a minimiza interferențele și pentru a asigura stabilitatea operațională în diverse condiții de mediu.
- 14) S-a proiectat și implementat un sistem de alimentare eficient pentru a susține cerințele de putere ale prehensorului, luând în considerare consumul de energie și durata de viață a bateriei în aplicațiile practice.
- 15) S-a dezvoltat interfața de control utilizator (UI) pentru a permite operatorului să interacționeze eficient cu prehensorul, inclusiv setarea parametrilor de operare și monitorizarea stării sistemului în timp real.
- 16) S-au optimizat algoritmi de control pentru a asigura mișcări precise și rapide ale prehensorului, adaptându-le pentru a răspunde rapid la schimbările în mediul de operare și la cerințele de manipulare a obiectelor.
- 17) S-au dezvoltat modele matematice și s-au realizat simulări avansate pentru a evalua și a controla vibrațiile structurale ale prehensorului în timpul operațiunilor.
- 18) S-a integrat reductorul în sistemul prehensorului, evaluând impactul acestuia asupra performanței generale și asupra reducerii vibrațiilor.
- 19) S-a efectuat calculul matematic pentru determinarea raportului optim de diminuare în funcție de cerințele de cuplu și de precizie.
- 20) S-au analizat experimental performanțele reductorului în ceea ce privește reducerea vibrațiilor și îmbunătățirea controlului asupra mișcărilor.
- 21) S-a proiectat și implementat o arhitectură logică care permite prehensarea independentă din punct de vedere mecanic, electric și software, asigurând integrarea corectă a fiecărui modul în sistemul global.
- 22) S-au detaliat componentele sistemului senzorial, inclusiv a encoderului rezistiv, a platbandei pentru mișcarea de translație și rotație, și a senzorului inductiv, evidențiind rolul fiecărei componente în asigurarea funcționalității sistemului.
- 23) S-au propus și implementat algoritmi pentru optimizarea corecțiilor în timp real în funcție de variabilitatea parametrilor generați de senzori în timpul mișcării, asigurând adaptabilitatea sistemului la condițiile de prehensiune specifice fiecărui obiect.

24) S-a integrat și testat funcționalitatea sistemului senzorial pe sisteme de prehensiune clasice, demonstrând randamentul maxim al sistemului de prehensiune autoadaptiv comparativ cu variantele tradiționale.

25) S-a testat și validat funcționalitatea sistemului, demonstrând eficiența și precizia acestuia în manipularea obiectelor fără a le deforma sau a le amprenta.

26) S-a proiectat detaliat schema de comunicare Master-Slave, asigurând o interacțiune eficientă și sincronizată între controllerul Master și modulele Slave. Acest lucru a implicat definirea protocolului de comunicare, atribuirea responsabilităților și implementarea mecanismelor de sincronizare.

27) S-a dezvoltat și implementat un algoritm avansat de control pentru controllerul Master, care permite luarea rapidă a deciziilor în funcție de feedback-ul primit de la modulele Slave. Acest algoritm optimizează timpul de reacție al prehensorului în procesul de prehensiune, contribuind la îmbunătățirea eficienței și preciziei sistemului.

28) S-a integrat protocolul de comunicare Master-Slave în cadrul prehensorului și s-a testat pentru a asigura transmiterea corectă și sigură a datelor între controllerul Master și modulele Slave. Aceasta a implicat și dezvoltarea unor scenarii de testare complexe pentru validarea performanței comunicării.

7.3. Diseminarea rezultatelor

O parte din rezultatele obținute în urma studiului desfășurat în cadrul stagiului de doctorat au fost diseminate prin publicarea mai multor articole științifice, ca prim autor și coautor, prezentate în cadrul unor conferințe internaționale sau publicate în jurnale de specialitate, după cum urmează:

- [1] **C. Frincu**, I. Stroe, and I. Staretu, 'Constructive Optimization of an Adaptive Mechanical Gripper Based on Vibration Level', 2023. doi: 10.1109/EMES58375.2023.10171726.
- [2] **C. I. Frincu**, I. Stroe, and I. Staretu, 'Innovative self-adaptive gripper design, functional simulation, and testing prototype', *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1177/17298806221119345.
- [3] **I. C. Frincu** and I. Stroe, 'The state of stress and deformation by the finite element method of the mechanical structure for a self-adaptive prehensor', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 568, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/568/1/012088.
- [4] **C. Frincu** and I. Stroe, 'The state of the modular element structure of a prehensor through virtual prototyping', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 514, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/514/1/012024.
- [5] **C. Frincu** and I. Stroe, 'Mechanical Geometry of a Self-Adaptive Prehensor with 2 or more Fingers', *Int. J. Control Syst. Robot.*, vol. 4, pp. 33–36, 2019.
- [6] **C. Frincu** and I. Stroe, 'The structure of a sliding sensory system for a self-adaptive prehensor', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 568, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/568/1/012071

7.4. Direcții viitoare de cercetare

Această teză de doctorat aduce contribuții semnificative la eficientizarea și scurtarea duratelor proceselor de manipulare în sectorul industrial. Pentru a crește atractivitatea procesului propus pentru producătorii din acest domeniu, este esențială o îmbunătățire considerabilă a procedurii.

În această direcție, pentru industrie se pot explora următoarele direcții de cercetare:

1. Optimizarea software-ului pentru îmbunătățirea prehensării.
2. Integrarea unui senzor optic pentru măsurarea distanței dintre prehensor și masa de lucru.
3. Aplicarea prehensorului pe un robot industrial KUKA pentru a obține următoarele informații:

- Analiza deformărilor plastice și elastice ale prehensorului în condiții de mișcare rectilinie, circulară și oscilatorie, la diferite viteze.
 - Evaluarea vibrațiilor exercitate asupra bacurilor în condiții diverse de mișcare.
 - Calculul forțelor inerțiale generate de un prehensor care manipulează un obiect cu greutatea de 1 kg.
 - Determinarea forțelor de strângere necesare pentru manipularea obiectelor.
4. Perfecționarea structurii prehensorului.
 5. Actualizarea software-ului cu parametrii obținuți din cercetare.
 6. Integrarea unei camere 3D pentru optimizarea procesului de prehensare.
 7. Implementarea inteligenței artificiale prin dezvoltarea unui algoritm de învățare automată (Machine Learning).

BIBLIOGRAFIE

- [1] 'Zoo.ro'. <http://www.zoo.ro/>
- [2] M. Manz, S. Bartsch, M. Simnofske, and F. Kirchner, 'Development of a self-adaptive gripper and implementation of a gripping reflex to increase the dynamic payload capacity', *47th Int. Symp. Robot. ISR 2016*, no. June, pp. 56–62, 2016.
- [3] D. ȚĂRLIMAN, 'Cercetări privind sistemele de prehensiune ale roboților industriali acționate cu ajutorul mușchilor pneumatici Research concerning the gripper systems of industrial robots actuated by pneumatic muscles', Școala Doctorală Interdisciplinară, Brașov, 2014.
- [4] S. Jonathan Monteiro, 'Adaptive Gripping Technology Development of a gripper interface for SCHUNK Dextrous Hand', 2010.
- [5] S. Ionel, N. Mircea, and A. N, *Mâini mecanice. Mecanisme antropomorfe de prehensiune pentru protezare și roboți*. Brașov, 2001.
- [6] U. Fischer, *Mechanical and metal trades handbook*. Tabellenbuch Metall, 2008.
- [7] I. Staretu, *Prehensiune mecanice reconfigurabile cu trei și patru degete pentru roboți (II)*.
- [8] I. Staretu, *Sisteme de prehensiune (Ediția I)*. Brașov, 1996.
- [9] I. Staretu, *Sisteme de prehensiune (Ediția II)*. 2010.
- [10] 'Start Production Faster - Robotiq'. <https://robotiq.com/>
- [11] 'Tehnologie de automatizare și soluții de instruire tehnică | Festo RO'. <https://www.festo.com/ro/ro/>
- [12] T. Ortmaier and G. Hirzinger, 'Cartesian Control of Robots with Working-Position Dependent Dynamics', *IFAC Proc. Vol.*, vol. 33, no. 27, pp. 617–621, 2000, doi: 10.1016/s1474-6670(17)37999-5.
- [13] X. Han and R. J. Richards, 'Variable structure control of robot manipulators in cartesian space with efficient computation', *IFAC Proc. Vol.*, vol. 27, no. 14, pp. 109–114, 1994, doi: 10.1016/s1474-6670(17)47302-2.
- [14] S. Ionel, 'PREHENSOARE ANTROPOMORFE CU BARE ARTICULATE SAU CU FIRE ȘI ROLE PENTRU ROBOȚI INDUSTRIALI – SINTEZĂ, ANALIZĂ', no. 1, 2009.
- [15] G. Castelli, E. Ottaviano, and P. Rea, 'A Cartesian Cable-Suspended Robot for improving end-users' mobility in an urban environment', *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 30, no. 3, pp. 335–343, 2014, doi: 10.1016/j.rcim.2013.11.001.
- [16] M. A. Arteaga, A. Castillo-Sánchez, and V. Parra-Vega, 'Cartesian control of robots without dynamic model and observer design', *Automatica*, vol. 42, no. 3, pp. 473–480, 2006, doi: 10.1016/j.automatica.2005.11.004.
- [17] V. Lippiello and F. Ruggiero, *Cartesian impedance control of a UAV with a robotic Arm*, vol. 10, no. PART 1. IFAC, 2012. doi: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00158.
- [18] V. Parra-Vega, R. García-Rodríguez, and F. Ruiz-Sanchez, 'Cartesian sliding PD force-position control for constrained robots under jacobian uncertainty', *IFAC Proc. Vol.*, vol. 38, no. 1, pp. 145–150, 2005, doi: 10.3182/20050703-6-cz-1902.01294.
- [19] H. Celikoglu, N. D. Sims, and E. Ozturk, 'Cartesian stiffness optimization for serial arm robots', *Procedia CIRP*, vol. 77, no. Hpc, pp. 566–569, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.222.
- [20] A. Wahrburg, B. Matthias, and H. Ding, 'Cartesian contact force estimation for robotic manipulators - A fault isolation perspective', *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 21, pp. 1232–1237, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.09.694.
- [21] A. Catalin, *Simularea pe calculator a sistemelor mecanice articulate*. Brașov, Romania: Lux Libris, 2000.
- [22] A. Catalin, *Software Platform for Analyzing and Optimizing the Mechanical System*. Brașov, Romania: Springer Science&Business Media, 2009.
- [23] 'PowerGripper | Festo CA'. https://www.festo.com/ca/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2010-to-2012/powergripper-id_33664/
- [24] C. Stăncescu, S. I., and M. Bolboe, 'Aspects Concerning the Systematization of Gripping Device with Jaws', in *The 9th International Conference of Mechanisms and Mechanical Transmissions*,

2004, pp. 729–734.

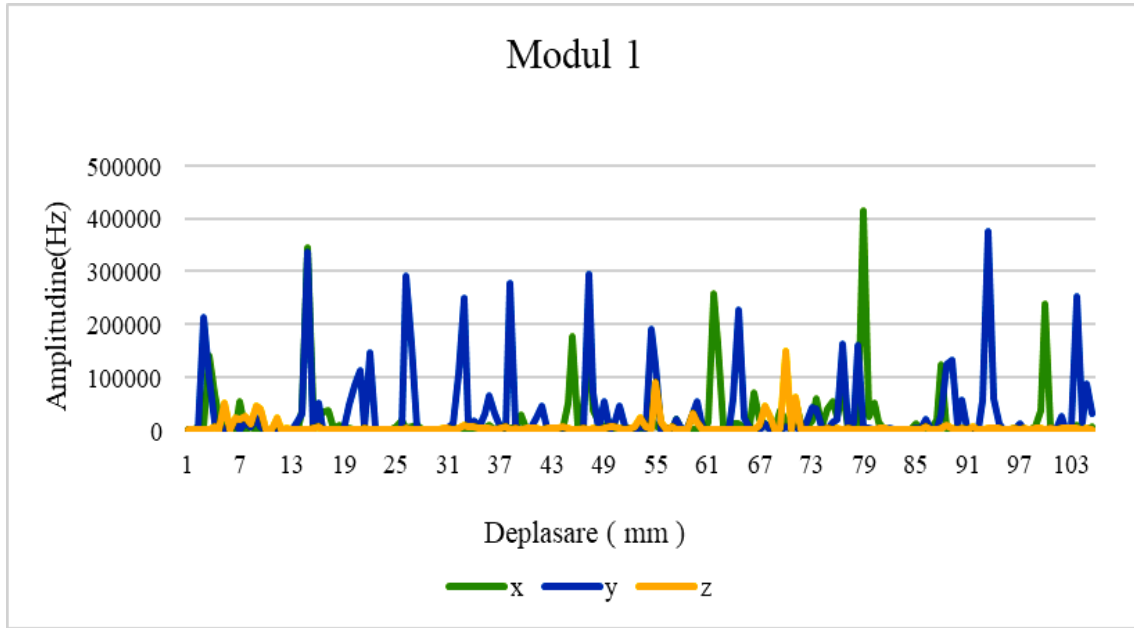
- [25] Y. S. Fan and G. T. Zheng, 'Research of high-resolution vibration signal detection technique and application to mechanical fault diagnosis', *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 2, pp. 678–687, Feb. 2007, doi: 10.1016/J.YMSSP.2005.10.001.
- [26] F. Beltrán-Carbajal, G. Silva-Navarro, F. Beltrán-Carbajal, and G. Silva-Navarro, 'Active vibration control in Duffing mechanical systems using dynamic vibration absorbers', *JSV*, vol. 333, no. 14, pp. 3019–3030, 2014, doi: 10.1016/J.JSV.2014.03.002.
- [27] S. Electronics, 'Vibration Sensor SW-18010P'. <https://www.sunrom.com/p/vibration-sensor-sw-18010p>
- [28] F. J. Blaauw *et al.*, 'Let's get Physiqua! – An intuitive and generic method to combine sensor technology with ecological momentary assessments', *J. Biomed. Inform.*, vol. 63, pp. 141–149, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.JBI.2016.08.001.
- [29] L. Dal Bo, P. Gardonio, and E. Turco, 'Analysis and scaling study of vibration energy harvesting with reactive electromagnetic and piezoelectric transducers', *J. Sound Vib.*, vol. 484, p. 115510, 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115510.
- [30] R. S. Langley, 'On the statistical mechanics of structural vibration', *J. Sound Vib.*, vol. 466, p. 115034, 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2019.115034.
- [31] F. Li, H. Wu, and P. Wu, 'Vibration fatigue dynamic stress simulation under non-stationary state', *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 146, p. 107006, 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.107006.
- [32] F. J. Badesa, R. Morales, N. Garcia-Aracil, J. M. Sabater, A. Casals, and L. Zollo, 'Auto-adaptive robot-aided therapy using machine learning techniques', *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 116, no. 2, pp. 123–130, 2014, doi: 10.1016/j.cmpb.2013.09.011.
- [33] Z. Gosiewski and A. P. Koszewnik, 'Fast prototyping method for the active vibration damping system of mechanical structures', *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 36, no. 1, pp. 136–151, 2013, doi: 10.1016/j.ymsp.2011.12.011.
- [34] H. B. M. GmbH, 'Strain Gauges.' doi: 10.5040/9781501365072.15711.
- [35] S. Aurel Cornile, *Senzori si traductoare*. Editura Universității Transilvania Brașov, 2015.
- [36] S. Ioan, *Senzori si traductoare pentru roboti industriali*. 2000.
- [37] 'E5 | US Digital'. <https://www.usdigital.com/products/encoders/incremental/kit/e5/>
- [38] 'Encoder rotativ Arduino'. <https://www.robofun.ro/mecanice/encoder-rotativ-arduino.html>
- [39] 'MIT App Inventor'. <https://appinventor.mit.edu/>

ANEXE

Anexa 1. Valorile vibrațiilor măsurate pentru fiecare modul al prehsorului

Anexa 1.1. Vibrații in modulul 1

Frecvența Modulului 1 (Hz)			Frecvența Modulului 1 (Hz)		
x	y	z	x	y	z
0	0	97	17155	870	1596
0	0	0	3256	290618	2512
5503	0	478	5583	163894	2098
7156	214456	549	9422	946	1753
139435	97289	259	2216	29	46
68474	13610	7167	552	1124	2164
25117	1350	269	1529	407	602
1445	3309	52226	99	29	0
9271	11	58	718	955	3755
0	14075	22569	454	2885	3990
53711	1588	19690	245	11519	422
520	14990	26852	742	107392	3650
6352	5188	12879	1096	250657	8962
354	24106	46558	1353	6716	5147
350	6009	39535	392	17186	5109
186	1122	166	94	7450	4734
137	78	1226	2638	30699	2744
1143	70	22935	8939	63947	3880
352	1302	0	243	30275	233
74	1096	3195	356	5218	3568
1076	1169	372	6085	176	7123
266	18148	125	4556	276398	2191
36132	30709	300	3842	7278	3398
345544	335426	950	27398	1190	399
42976	4843	2459	2201	1012	4622
22356	52460	5054	362	2278	3263
33796	426	89	1246	23315	3990
36684	79	36	16	46830	621
2133	62	1420	4	1104	4187
8809	183	1401	29	575	4738
1941	237	100	4280	371	4174
2335	49541	1982	1659	160	7125
1391	83252	1346	52144	336	3310
1054	111806	204	176792	423	205
143	3361	3308	2931	220	0
133	147274	1238	48852	653	3823
295	2133	0	144640	294015	149
1543	1259	2097	36568	70684	4099
699	42	1192	16752	2135	0
79	164	531	4958	55071	2447
6994	332	1958	13989	809	5475

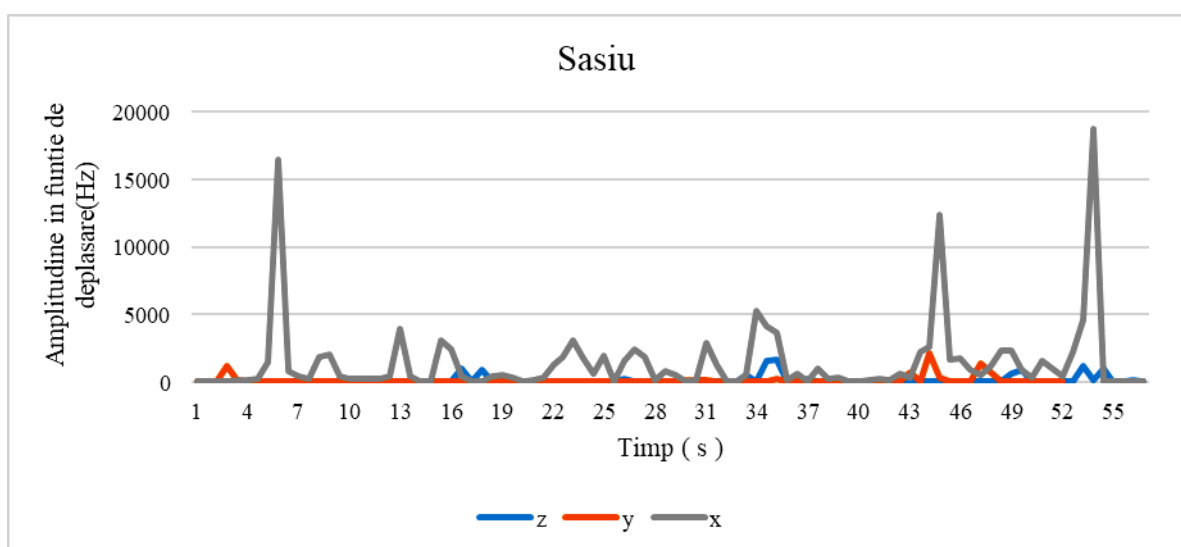


Anexa 2. Valorile vibrațiilor măsurate pe cele 3 axe a șasiului pe care sunt prinse cele 5 module ale prehensorului

Șasiu (Hz)			Șasiu (Hz)		
z	y	x	z	y	x
0	0	0	0	76	3105
2	0	0	3	11	2434
3	75	21	980	0	421
8	1149	74	2	7	0
2	110	104	918	38	0
2	14	109	37	13	424
0	8	197	11	21	514
2	3	1474	2	7	342
2	30	16472	2	30	0
0	50	810	2	18	93
2	38	450	0	14	278
2	30	273	4	18	1244
0	3	1861	3	30	1845
0	7	2006	4	38	3036
2	18	435	38	7	1764
2	17	223	38	68	623
0	50	209	38	8	1933
28	38	187	37	18	67
37	38	254	267	27	1519
6	8	428	31	12	2403
35	38	3939	4	7	1853
2	38	424	0	21	108
37	31	86	2	43	823
0	7	55	2	7	528

Şasiu (Hz)		
z	y	x
3	89	72
2	101	119
5	121	2879
0	67	1242
0	0	43
2	0	0
478	0	546
18	0	5265
1541	0	4149
1695	208	3651
0	17	124
0	101	610
252	7	0
3	38	1025
0	17	204
2	38	311

Şasiu (Hz)		
z	y	x
2	38	0
0	17	87
3	38	166
28	38	192
38	20	157
2	12	648
37	692	335
33	0	2258
2	2103	2571
0	343	12353
0	2	1650
38	7	1715
40	13	907
0	1359	556
3	740	1152



Anexa 3. Date colectate ale fazelor forțelor pentru fiecare modul al prehensorului

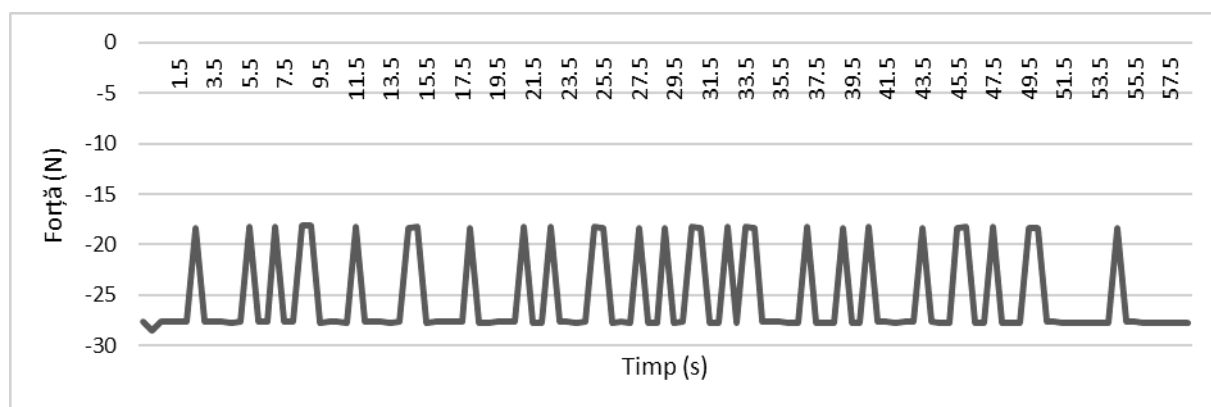
Anexa 3.1. Modul 1 – Faza 1

Valori modul 1 (zgomot la liber)
17:56:01.365 -> Greutate: -18.07 unități
17:56:01.876 -> Greutate: -27.65 unități
17:56:02.433 -> Greutate: -28.47 unități
17:56:02.949 -> Greutate: -27.63 unități
17:56:03.463 -> Greutate: -27.66 unități
17:56:03.975 -> Greutate: -27.62 unități
17:56:04.534 -> Greutate: -27.62 unități
17:56:05.045 -> Greutate: -18.34 unități

Valori modul 1 (zgomot la liber)
17:56:05.557 -> Greutate: -27.65 unități
17:56:06.115 -> Greutate: -27.66 unități
17:56:06.627 -> Greutate: -27.63 unități
17:56:07.182 -> Greutate: -27.74 unități
17:56:07.695 -> Greutate: -27.65 unități
17:56:08.209 -> Greutate: -18.25 unități
17:56:08.720 -> Greutate: -27.67 unități
17:56:09.279 -> Greutate: -27.68 unități

Valori modul 1 (zgomot la liber)
17:56:09.792 -> Greutate: -18.24 unități
17:56:10.305 -> Greutate: -27.65 unități
17:56:10.822 -> Greutate: -27.65 unități
17:56:11.376 -> Greutate: -18.15 unități
17:56:11.884 -> Greutate: -18.09 unități
17:56:12.396 -> Greutate: -27.71 unități
17:56:12.906 -> Greutate: -27.70 unități
17:56:13.463 -> Greutate: -27.64 unități
17:56:13.975 -> Greutate: -27.74 unități
17:56:14.490 -> Greutate: -18.21 unități
17:56:15.049 -> Greutate: -27.70 unități
17:56:15.565 -> Greutate: -27.60 unități
17:56:16.078 -> Greutate: -27.63 unități
17:56:16.590 -> Greutate: -27.71 unități
17:56:17.104 -> Greutate: -27.69 unități
17:56:17.663 -> Greutate: -18.37 unități
17:56:18.174 -> Greutate: -18.27 unități
17:56:18.733 -> Greutate: -27.71 unități
17:56:19.250 -> Greutate: -27.62 unități
17:56:19.808 -> Greutate: -27.68 unități
17:56:20.321 -> Greutate: -27.64 unități
17:56:20.835 -> Greutate: -27.66 unități
17:56:21.345 -> Greutate: -18.40 unități
17:56:21.904 -> Greutate: -27.71 unități
17:56:22.419 -> Greutate: -27.71 unități
17:56:22.940 -> Greutate: -27.69 unități
17:56:23.460 -> Greutate: -27.67 unități
17:56:23.977 -> Greutate: -27.62 unități
17:56:24.497 -> Greutate: -18.23 unități

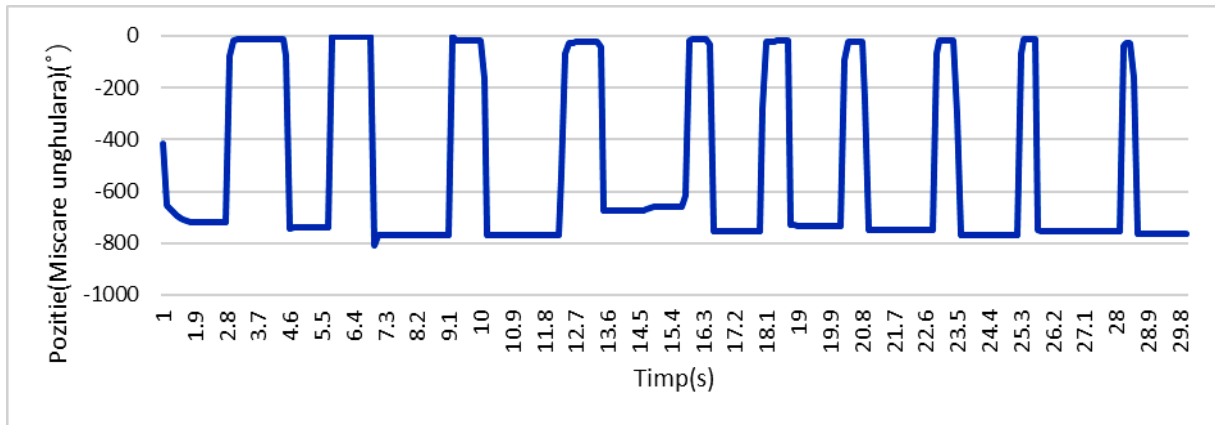
Valori modul 1 (zgomot la liber)
17:56:33.975 -> Greutate: -27.69 unități
17:56:34.492 -> Greutate: -18.27 unități
17:56:35.051 -> Greutate: -132.19 unități
17:56:35.563 -> Greutate: -27.74 unități
17:56:36.075 -> Greutate: -27.83 unități
17:56:36.636 -> Greutate: -18.25 unități
17:56:37.150 -> Greutate: -27.77 unități
17:56:37.662 -> Greutate: -18.26 unități
17:56:38.223 -> Greutate: -18.38 unități
17:56:38.739 -> Greutate: -27.70 unități
17:56:39.299 -> Greutate: -27.66 unități
17:56:39.813 -> Greutate: -27.69 unități
17:56:40.322 -> Greutate: -27.76 unități
17:56:40.836 -> Greutate: -27.73 unități
17:56:41.349 -> Greutate: -18.22 unități
17:56:41.909 -> Greutate: -27.71 unități
17:56:42.469 -> Greutate: -27.76 unități
17:56:42.981 -> Greutate: -27.71 unități
17:56:43.492 -> Greutate: -18.36 unități
17:56:44.006 -> Greutate: -27.72 unități
17:56:44.520 -> Greutate: -27.71 unități
17:56:45.082 -> Greutate: -18.25 unități
17:56:45.595 -> Greutate: -27.66 unități
17:56:46.110 -> Greutate: -27.70 unități
17:56:46.619 -> Greutate: -27.74 unități
17:56:47.177 -> Greutate: -27.70 unități
17:56:47.692 -> Greutate: -27.66 unități
17:56:48.205 -> Greutate: -18.32 unități
17:56:48.716 -> Greutate: -27.68 unități



Anexa 4. Date colectate pentru etapele unghiulare ale fiecărui modul al prehsorului

Anexa 4.1. Modul 1 – etapa 1

Determinarea unghiulară pentru contact	Determinarea unghiulară pentru contact
09:41:48.289 -> Position: -417	09:41:52.600 -> Position: -738
09:41:48.381 -> Position: -654	09:41:52.739 -> Position: -738
09:41:48.428 -> Position: -666	09:41:52.924 -> Position: -738
09:41:48.473 -> Position: -678	09:41:53.063 -> Position: -738
09:41:48.566 -> Position: -695	09:41:53.203 -> Position: -738
09:41:48.611 -> Position: -702	09:41:53.390 -> Position: -738
09:41:48.749 -> Position: -710	09:41:53.530 -> Position: -738
09:41:48.842 -> Position: -715	09:41:53.715 -> Position: -738
09:41:48.889 -> Position: -717	09:41:53.808 -> Position: 2
09:41:49.029 -> Position: -718	09:41:53.948 -> Position: -2
09:41:49.121 -> Position: -719	09:41:54.040 -> Position: -2
09:41:49.214 -> Position: -719	09:41:54.132 -> Position: -2
09:41:49.306 -> Position: -720	09:41:54.224 -> Position: -2
09:41:49.492 -> Position: -720	09:41:54.316 -> Position: -2
09:41:49.631 -> Position: -720	09:41:54.410 -> Position: -2
09:41:49.814 -> Position: -720	09:41:54.551 -> Position: -2
09:41:49.953 -> Position: -720	09:41:54.644 -> Position: -2
09:41:50.094 -> Position: -720	09:41:54.736 -> Position: -2
09:41:50.280 -> Position: -720	09:41:54.829 -> Position: -2
09:41:50.372 -> Position: -80	09:41:54.922 -> Position: -2
09:41:50.418 -> Position: -18	09:41:55.015 -> Position: -807
09:41:50.512 -> Position: -15	09:41:55.152 -> Position: -771
09:41:50.606 -> Position: -15	09:41:55.245 -> Position: -771
09:41:50.699 -> Position: -15	09:41:55.338 -> Position: -771
09:41:50.792 -> Position: -14	09:41:55.431 -> Position: -771
09:41:50.931 -> Position: -14	09:41:55.523 -> Position: -771
09:41:51.024 -> Position: -14	09:41:55.616 -> Position: -771
09:41:51.117 -> Position: -14	09:41:55.754 -> Position: -771
09:41:51.211 -> Position: -14	09:41:55.846 -> Position: -771
09:41:51.303 -> Position: -14	09:41:55.939 -> Position: -771
09:41:51.395 -> Position: -14	09:41:56.031 -> Position: -771
09:41:51.535 -> Position: -14	09:41:56.123 -> Position: -771
09:41:51.629 -> Position: -14	09:41:56.261 -> Position: -771
09:41:51.722 -> Position: -14	09:41:56.353 -> Position: -771
09:41:51.814 -> Position: -14	09:41:56.445 -> Position: -771
09:41:51.906 -> Position: -79	09:41:56.538 -> Position: -771
09:41:52.000 -> Position: -743	09:41:56.630 -> Position: -771
09:41:52.093 -> Position: -738	09:41:56.724 -> Position: -771
09:41:52.279 -> Position: -738	09:41:56.863 -> Position: -771
09:41:52.416 -> Position: -738	09:41:56.955 -> Position: -771



Anexa 5. Forma finală a prehsorului



