



**UNIVERSITATEA “EFTIMIE MURGU” DIN REȘIȚA
FACULTATEA DE INGINERIE ȘI MANAGEMENT
ȘCOALA DOCTORALĂ**

Nr. Decizie Senat 248 din 10 Iunie 2015

TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETĂRI PRIVIND DISPOZITIVELE DE PREHENSIUNE
ACȚIONATE DE ACTUATORI DIN ALIAJE CU MEMORIA
FORMEI ALE ROBOȚILOR INDUSTRIALI**

**RESEARCHES REGARDING THE INDUSTRIAL ROBOT’S
PREHENSION DEVICES ACTIONED BY ACTUATORS FROM
SHAPE MEMORY ALLOYS**

Autor :
Ing. Daniel AMARIEI

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof.univ.dr.ing. Gilbert-Rainer GILLICH	Univ. „Eftimie Murgu” din Reșița
Conducător de doctorat	Prof.univ.dr.ing. Ion VELA	Univ. „Eftimie Murgu” din Reșița
Referent	Prof.univ.dr.ing. Ion CIUCĂ	Univ. ” Politehnica” din București
Referent	Prof.univ.dr.ing. H.C. Polidor BRATU	Univ. ” Dunărea de Jos” din Galați
Referent	Prof.univ.dr.ing. Dorian NEDELCU	Univ. „Eftimie Murgu” din Reșița

**REȘIȚA
26.06.2015**

CUVÂNT ÎNAINTE

*Munca umană a fost întotdeauna asociată cu formarea unor deprinderi specifice, metode și unelte care să asigure un mediu de producție mai ușor și mai eficient. Creșterea competiției între roboții industri+ali care să efectueze sarcini care în mod normal erau efectuate de către mâinile umane a condus la necesitatea dezvoltării de echipamente adecvate, în special a **dispozitivelor de prehensiune** (numite în mod uzual „**prehensori**”).*

Cu toate acestea însă, un asemenea dispozitiv nu poate înlocui foarte ușor mâna umană. Eficacitatea prehensorilor este demonstrată în special în aplicații care depășesc un nivel normal al abilității convenționale umane, fie în domeniul temporal, fie în domeniul fizic (ex. repetabilitate, precizie, forță, spații periculoase, cu condiții de mediu dăunătoare omului sau condiții necunoscute de exploatare, etc.).

Așa cum mâna este organul uman de manipulare, tot așa prehensorii sunt de cele mai multe ori componentele care intră în contact direct cu piesele de lucru. Datorită acestui motiv necesită o atenție aparte, cu atât mai mult cu cât este cunoscut faptul că robotica urmează să joace un rol însemnat în restructurarea civilizației mileniului trei, lucru pe care încearcă să îl sublinieze și teza de față.

Prin modul de tratare abordat, s-a pus un accent deosebit pe căutarea, găsirea și argumentarea justificată a unei soluții optime pentru acționarea prehensorului robotic ales, pe dezvoltarea gândirii tehnico-economice care să permită rezolvarea unora din problemele ingineresti specifice automatizării prin robotizare.

*Finalizarea a unei etape de perfecționare a existenței personale într-un mediu de maximă exigență, mediul academic ingineresc, prin materializarea conform dorințelor proprii a ceea ce am crezut odată că este posibil, aduce un inestimabil sentiment de satisfacție, definită de O'Reilly în 1991 ca fiind **atitudinea generală față de muncă**.*

*Cercetările efectuate de-a lungul perioadei destul de îndelungate în care s-a dezvoltat și finalizat această teză au fost posibile inițial datorită finanțării necesare obținute prin **contractul de finanțare nr. 748/15.01.2009** pentru proiectul **Cercetări privind îmbunătățirea parametrilor de răspuns în timp real al actuatorilor cu elemente active din aliaje cu memoria formei pentru modulele robotice de prehensiune**, proiect finanțat de Consiliul Național al Cercetării Științifice din Învățământul Superior (C.N.C.S.I.S.) prin Programul IDEI - Proiecte de Cercetare Exploratorie din cadrul Planului Național de Cercetare, Dezvoltare și Inovare - P.N. II, finanțare care a asigurat nu doar baza materială necesară dezvoltării prehensorului acționat de actuatorul cu elemente active din aliaje cu memoria formei cât și participarea la conferințe de prestigiu în domeniu în vederea diseminării pe o scară cât mai largă a rezultatelor obținute.*

*Astfel, finalizând activitatea de cercetare în această direcție prin această teză, nu pot decât să încerc un adânc sentiment de împlinire profesională. Pentru încrederea acordată, sprijinul moral, pentru sfaturile și coordonarea pe tot parcursul cercetărilor și a elaborării tezei de doctorat, mulțumesc cu deosebită stimă și aleasă considerație distinsului meu conducător științific, **Prof.univ.Dr.Ing. Ion VELA**.*

*Mulțumiri deosebite se cuvin de asemenea domnilor **Prof.univ.dr.ing. Ion CIUCĂ** de la Universitatea “Politehnica” București, **Prof.univ.dr.ing.H.C. Polidor BRATU** de la Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați și **Prof.univ.dr.ing. Dorian NEDELCU** de la Universitatea “Eftimie Murgu” din Reșița, care mi-au făcut deosebita onoare de a accepta să facă parte din comisia de doctorat.*

*Un călduros cuvânt de prețuire și mulțumire conducerii Universității “Eftimie Murgu” din Reșița și tuturor colegilor care m-au ajutat de-a lungul perioadei de desfășurare a studiilor de doctorat, îndeosebi domnilor **Prof.univ.Dr.Ing.Ec. Gilbert-Rainer GILLICH**, **Conf.Dr.Ing. Călin Octavian MICLOȘINĂ**, **Dr.Ing. Cornel MITULEȚU**, **Dr.Ing. Marius TUFOI** și, mai recent domnului **Johannes BACHLER**, **MSc. MBA**, care, prin sfaturile lor, prin propunerile concrete și prin ajutorul dat mi-au fost de un real folos în realizarea acestei teze.*

*Dar toate acestea au fost posibile numai datorită soției mele **OLGA IOANA**, a fiilor mei **ALEXANDRU-VICTOR** și **DANIEL-MIHAI**, care mi-au fost aproape întotdeauna prin încurajări, prin sprijin permanent, prin înțelegerea de care au dat dovadă și cu care m-au înconjurat pe tot parcursul acestei perioade de elaborare a tezei, fără de care nu aș fi reușit niciodată să finalizez această lucrare.*

Autorul

CUPRINS

CUVÂNT ÎNAINTE.....	2
LISTA FIGURILOR	6
LISTA TABELELOR.....	9
LISTA ABREVIERILOR	10
1. INTRODUCERE	11
1.1. Introducere în problematica lucrării	11
1.2. Scopul și obiectivele tezei.....	16
1.3. Structura tezei	17
1.4. Concluzii	20
2. CAPITOLUL II. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL DISPOZITIVELOR DE PREHENSIUNE ACȚIONATE DE ALIAJE CU MEMORIA FORMEI	21
2.1. Scurt istoric al dispozitivelor de prehensiune.....	21
2.2. Generalități privind aspectele constructiv-funcționale ale efectorilor finali	26
2.2.1. Structura și funcțiile efectorilor finali	29
2.2.2. Clasificarea dispozitivelor de prehensiune	39
2.3. Generalități privind acționarea dispozitivelor de prehensiune	40
2.3.1. Actuatori clasici	42
2.3.2. Actuatori cu elemente din aliaje cu memoria formei.....	47
2.4. Considerații privitoare la aliajele cu memoria formei.....	48
2.4.1. Aspecte privind funcționarea aliajelor cu memoria formei	49
2.5. Alegerea soluției constructiv-funcționale a dispozitivului de prehensiune acționat de actuatori cu elemente active din AMF.....	52
2.6. Concluzii și contribuții personale	52
3. CAPITOLUL III. CERCETĂRI PRIVIND PARAMETRII CONSTRUCTIVI ȘI FUNCȚIONALI AI ACTUATORILOR CU ELEMENTE ACTIVE DIN ALIAJE CU MEMORIA FORMEI	54
3.1. Generalități privind actuatorii cu elemente active din aliaje cu memoria formei	54
3.1.1. Alegerea formei geometrice a elementelor active din AMF	55
3.1.2. Varianta constructivă de actuatori cu elemente active din aliaje cu memoria formei.....	64
3.2. Concluzii și contribuții personale	74
4. CAPITOLUL IV. MODELAREA MATEMATICĂ ȘI SIMULAREA PREHENSIUNII MECANICE CU UN DISPOZITIV DE PREHENSIUNE ACȚIONAT DE UN ACTUATOR CU ELEMENTE ACTIVE DIN AMF	76
4.1. Modelarea matematică a efectului de memoria formei	76
4.1.1. Modelul matematic	78
4.2. Modelarea prehensiunii mecanice	83
4.2.1. Modelarea contactului mecanic	84
4.2.2. Tipuri de contacte mecanice (obiect de manipulat - braț prehensor).....	85
4.3. Prehensiunea statică - condiții minime	88
4.4. Simularea funcționării dispozitivului de prehensiune	90
4.4.1. Programul de simulare SolidWorks	90
4.4.2. Etapele simulării	91

4.5. Analiza dispozitivului de prehensiune.....	92
4.5.1. Alegerea soluției constructive pentru dispozitivul de prehensiune acționat de actuatori cu elemente active din AMF	94
4.5.2. Analiza structurală a dispozitivului de prehensiune.....	95
4.5.3. Analiza cinematică a dispozitivului de prehensiune.....	96
4.5.4. Analiza cinetostatică a dispozitivului de prehensiune.....	102
4.6. Concluzii și contribuții personale	105
5. CAPITOLUL V. CONSTRUCȚIA MODELULUI FUNCȚIONAL.....	107
5.1. Realizarea dispozitivului de prehensiune acționat de actuatorul cu elemente active din aliaje cu memoria formei	107
5.1.1. Senzorul de măsurare a temperaturii	108
5.1.2. Senzorul de măsurare a deplasării	109
5.1.3. Senzorul de măsurare a forței	110
5.1.4. Alegerea modului de comandă a elementelor active din AMF	112
5.2. Rezultatele încercărilor experimentale utilizând dispozitivul de prehensiune realizat.....	115
5.2.1. Răspunsul în buclă deschisă.....	116
5.2.2. Răspunsul indicial în buclă închisă.....	117
5.3. Concluzii și contribuții personale	118
6. CAPITOLUL VI. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. VALORIFICAREA ȘI DISEMINAREA REZULTATELOR.....	120
6.1. Concluzii generale.....	120
6.2. Contribuții personale	122
6.3. Direcții ulterioare de cercetare	123
6.4. Valorificarea și diseminarea rezultatelor	123
7. BIBLIOGRAFIE	125
8. ANEXE.....	131
Anexa 1. Tabel prehensori robotici	132
Anexa.2 Raport simulare SolidWorks actuator cu două arcuri de tracțiune.....	133
Anexa.3 Raport simulare SolidWorks actuator cu trei arcuri de tracțiune	134
Anexa 4. Desene părți componente dispozitiv de prehensiune	135
Anexa 5. Fișa tehnologică a materialului de execuție a părților componente a dispozitivului de prehensiune	136

LISTA FIGURILOR

Figura 1. Schițe de mecanizări ale lui Leonardo da Vinci.....	11
Figura 2. Brațul robotic PUMA.....	12
Figura 3. Schema structural - funcțională a robotului	14
Figura 4. Structurarea lucrării și interdependențele dintre capitole.....	19
Figura 5. Brațul STANFORD	22
Figura 6. Prehensor paralel.....	23
Figura 7. Brațul BARRETT	24
Figura 8. Dispozitivul de prehensiune inteligent BARRETT.....	24
Figura 9. Prehensorul SHADOW	25
Figura 10. Lanțuri cinematice	27
Figura 11. Schema structurală al unui robot RTTTRR	28
Figura 12. Variante ale mecanismelor generatoare de traiectorie	28
Figura 13. Schema bloc a efectorului final.....	29
Figura 14. Eroarea de centrare (a) și eroarea de centrare completă (b)	30
Figura 15. Semicentrarea (a) și centrarea (b) unui obiect prismatic cu 2 sau 4 bacuri.....	31
Figura 16. Centrarea obiectului prismatic prin contact cu bacuri rotitoare	31
Figura 17. Semicentrarea unui obiect cilindric între 2 bacuri paralele (a), și înclinate cu unghiul $\alpha \neq \pi$ (b) ...	32
Figura 18. Obiect cilindric semi-centrat pe un bac prismatic.....	32
Figura 19. Centrarea obiectului cilindric cu 3 bacuri având suprafețe plane neparalele	33
Figura 20. Centrarea obiectului cilindric prin contact cu bacuri plane și degete rotitoare	34
Figura 21. Centrarea obiectului cilindric cu bacuri prismatice și degete rotitoare	34
Figura 22. Amplasarea punctelor de contact pentru imobilizarea unui obiect paralelipipedic	36
Figura 23. Corelația dintre închiderea prin formă și cea prin forță a cuplei cinematice bacuri-obiect	36
Figura 24. Forțele de strângere care acționează asupra obiectului de manipulat.....	37
Figura 25. Corelația dintre deplasarea bacului și dimensiunea D a obiectului.....	38
Figura 26. Diferite caracteristici mecanice ale unor mecanisme de prehensiune	39
Figura 27. Clasificarea prehensorilor după tipul mișcării	40
Figura 28. Forme de energie și efecte pentru realizarea unor acțiuni mecanice.....	41
Figura 29. Curbe și mărimi caracteristice ale MPP	44
Figura 30. Principiul de funcționare a unui motor de curent continuu.....	45
Figura 31. Actuator liniar (from Moorlegheem 1993)	47
Figura 32. Actuator SMA (Bergamasco et al. 1989).....	47
Figura 33. Modelul Grant and Hayward (1995).....	48
Figura 34. Modelul endoscopului Hirose (1995)	48
Figura 35. Deformarea straturilor necesară pentru schimbarea structurii cristaline.....	49
Figura 36. Aranjarea atomilor în timpul formării martensitei	50
Figura 37. Aranjarea rețelei prin alunecare (a) și prin maclare (b)	50
Figura 38. Martensită deformată în urma răcirii prin alunecarea straturilor	50
Figura 39. Schema structural-funcțională a dispozitivului de prehensiune.....	52
Figura 40. Diagrama deplasare – temperatură pentru elemente din AMF	55

Figura 41. Element activ din AMF tip platbandă	57
Figura 42. Dimensiunile arcului elicoidal de compresiune din AMF	59
Figura 43. Dimensiunile arcului elicoidal de tracțiune din AMF	61
Figura 44. Diagrama tensiune-deformație pentru Nitinol	62
Figura 45. Calculator pentru dimensionarea arcurilor din AMF	63
Figura 46. Aplicație Java de vizualizare 3D a arcurilor din AMF	63
Figura 47. Stand experimental pentru testarea firului de Nitinol	66
Figura 48. Varianta cu un singur arc (compresiune-tracțiune) cu dublu sens de memoria formei.....	67
Figura 49. Funcționarea arcului cu dublu sens de memorie [90]	68
Figura 50. Principiul de funcționare al arcurilor de întindere din Nitinol [90]	68
Figura 51. Testarea unui singur arc de tracțiune	69
Figura 52. Testarea arcurilor de tracțiune (în paralel) cu sarcina de 700 grame	69
Figura 53. Generarea recuperării formei induse la arcurile de compresiune [90]	70
Figura 54. Testarea arcurilor de compresiune (în serie) cu sarcina 900 grame	70
Figura 55. Principiul de funcționare al tipului de actuator propus	71
Figura 56. Poziția actuatorului cu arcurile de tracțiune activate (CATIA).....	71
Figura 57. Poziția actuatorului cu arcurile de compresiune activate (CATIA)	72
Figura 58. Ansamblu funcțional al variantei constructive cu 4 arcuri (2 compresiune - 2 tracțiune)	72
Figura 59. Tensiunile von Mises pentru varianta cu 4 arcuri	72
Figura 60. Deplasarea actuatorului ales ca variantă optimă	73
Figura 61. Varianta cu 5 arcuri (2 compresiune - 3 tracțiune) cu simplu sens de memoria formei	73
Figura 62. Prima versiune a actuatorului cu arcuri din AMF	74
Figura 63. Principiul de funcționare al elementelor active funcție de temperatura de încălzire	79
Figura 64. Diagrama Deformare – Temperatură	80
Figura 65. Diagrama deformație - temperatură	83
Figura 66. Contact mecanic între obiectul de manipulat și efectorul prehensorului (fără frecare)	85
Figura 67. Contact mecanic între obiectul de manipulat și efectorul prehensorului (cu frecare).....	86
Figura 68. Contact mecanic între obiectul de manipulat (deformabil) și efectorul prehensorului (cu frecare).....	87
Figura 69. Reprezentarea prehensiunii statice.....	88
Figura 70. Dispozitivul de prehensiune.....	92
Figura 71. Discretizarea prehensorului paralel.....	93
Figura 72. Discretizarea prehensorului unghiular	93
Figura 73. Soluția propusă - Prehensor paralel	94
Figura 74. Soluția propusă - Prehensor unghiular	94
Figura 76. Schema cinematică a dispozitivelor de prehensiune	95
Figura 77. Traiectoriile punctelor caracteristice alese în cazul dispozitivului unghiular	97
Figura 78. Studiul deplasării – prehensor unghiular (pozițiile deschis - închis)	97
Figura 79. Traiectoriile punctelor caracteristice alese în cazul dispozitivului unghiular	98
Figura 80. Studiul deplasării – prehensor paralel (pozițiile deschis - închis).....	98
Figura 81. Compararea deplasărilor punctului caracteristic al efectorului final	98
Figura 82. Evoluția vitezelor de deplasare	99
Figura 83. Evoluția deplasării în cazul răcirii naturale.....	100
Figura 84. Evoluția deplasării în cazul răcirii forțate cu aer	100
Figura 85. Comparatie a deplasărilor funcție modul de răcire	100
Figura 86. Evoluția vitezei de deplasare în cazul răcirii naturale.....	101

Figura 87. Evoluția vitezei de deplasare în cazul răcirii forțate cu aer	101
Figura 88. Analiza comparativă a evoluției temporale a vitezelor (răcire naturală și forțată)	101
Figura 89. Simularea dispozitivului de prehensiune în funcționare liberă	102
Figura 90. Reprezentarea cuplelor caracteristice.....	103
Figura 91. Simularea dispozitivului de prehensiune cu sarcină aplicată	103
Figura 92. Reprezentarea evoluției deplasării elementului motor	103
Figura 93. Forțele de reacțiune din cupla C_S	104
Figura 94. Componenta după axa Z a forțelor de reacțiune cupla C_C	104
Figura 95. Comparația magnitudinilor din cupla conducătoare	105
Figura 96. Părțile componente ale prehensorului	107
Figura 97. Modelul experimental al prehensorului paralel.....	107
Figura 98. Fixarea elementelor active din Nitinol	108
Figura 99. Senzorii de măsurarea temperaturii -Termocuplele Omega.....	108
Figura 100. Traductorul cu laser pentru măsurarea deplasării tip LG10A65PU	109
Figura 101. Senzor de forță FlexiForce	110
Figura 102. Caracteristica senzorului FlexiForce.....	110
Figura 103. Datele de calibrare a senzorului FlexiForce	110
Figura 104. Convertorul Analogic - Digital - NI USB-6210.....	111
Figura 105. Standul experimental	111
Figura 106. Diagrama bloc a standului experimental.....	112
Figura 107. Principiul de funcționare al circuitului de control.....	112
Figura 108. Schema sistemului de control	113
Figura 109. Interfața cu utilizatorul a instrumentului Virtual LabView	115
Figura 110. Măsurarea forței de prehensiune (punerea în sarcină a DP)	115
Figura 111. Răspunsul tranzitoriu în buclă deschisă pentru toate cazurile de sarcină	116
Figura 112. Răspunsul indicial al sistemului cu regulator PID pentru situația fără sarcină	117
Figura 113. Răspunsul indicial al sistemului cu regulator PID pentru sarcină de 5 N	118
Figura 114. Răspunsul indicial al sistemului cu regulator PID pentru sarcină de 10 N.....	118

LISTA TABELELOR

Tabel 1. Clasificarea prehensoriilor funcție de metodele de prehensiune	39
Tabel 2. Principii de transformare a energiei și actuatorii semnificativi	42
Tabel 3. Timpii de reacție pentru diametre diferite de fire Flexinol în aer liber	60
Tabel 4. Caracteristicile tipurilor de AMF studiate	64
Tabel 5. Caracteristici de degradare și oboseală pentru aliajul Nitinol [5]	64
Tabel 6. Proprietățile aliajului cu memoria formei Ni-Ti.....	65
Tabel 7. Caracteristici ale firelor de Ni-Ti testate	67
Tabel 8. Parametrii de lucru al celor două tipuri de arcuri testate	70
Tabel 9. Valori de lucru pentru cele două tipuri de arcuri.....	114
Tabel 10. Rezultatele constantelor de timp pentru situațiile de încărcare	117
Tabel 11. Rezultate experimentale	118

LISTA ABREVIERILOR

AMF	- aliaj cu memoria formei
A_T	- arc de tracțiune
A_C	- arc de compresiune
A/D	- analog digital
C	- căldura specifică;
C_A	- cadru actuator
CE	- curent electric
CAD	- convertor analog - digital
CDA	- convertor digital - analog
$d\sigma/dT$	- viteza de tensionare
D	- deplasare
D/A	- digital analog
DP	- dispozitiv de prehensiune
EF	- efector final
F	- forță
F_E	- forță elastică
F_P	- forță de prehensiune
F_R	- forță de reacțiune
LR	- element de limitare a curentului
LDT	- filtru Large Data Type
NGL	- numărul gradelor de libertate
PC	- computer
PI	- proporțional - integrativ
PID	- proporțional - integrativ - derivativ
ST	- senzor de temperatură
T_I	- temperatură de încălzire
T_R	- temperatură de răcire
T_A	- temperatură mediu ambiant (22° C)
TF	- transfer de fază
TP	- transistor de putere
R_{AMF}	- rezistivitate AMF
T_{AMF}	- temperatura AMF
ΔT	- histerezisul termic
μC	- microcontroller
μP	- microprocesor
ρ	- densitatea
σ_{max}	- tensiunea maximă
σ_{min}	- tensiunea minimă

1. INTRODUCERE

1.1. Introducere în problematica lucrării

Din cele mai vechi timpuri, latura inovativă a spiritului uman a căutat permanent îmbunătățirea condițiilor de trai, ușurarea dificultății activităților de desfășurat din viața de zi cu zi. Instalațiile și mecanismele ancestrale sunt strămoșii roboților de azi. Avangardiștii din vremurile antice au început cu ceasurile de apă și echipamente de irigații. Apoi, morile de vânt și roțile sau ansamblurile de roți dințate acționate de apă au intervenit pentru înlocuirea forței fizice umane. Toate aceste mașini și instalații antice efectuau sarcini fără ajutor uman. Industrializarea a introdus apoi mecanizarea pentru producția de masă. În secolul XX, mașinile au ajuns însă să devină „inteligente”. Astfel, există utilaje sau instalații care sunt capabile să lucreze independent, să rezolve probleme și să pună soluțiile optime găsite în aplicare. Cibernetica a avut un aport deosebit pentru inteligența roboților. În prezent, avem roboți care examinează fundul mărilor și oceanelor, studiază forma peșterilor, explorează și studiază alte planete și construiesc mașini.

Leonardo da Vinci [125] a anticipat, gândit și desenat deja în secolul XIV multiple schițe de mâini ce aduceau cu cele robotice (Figura 1).

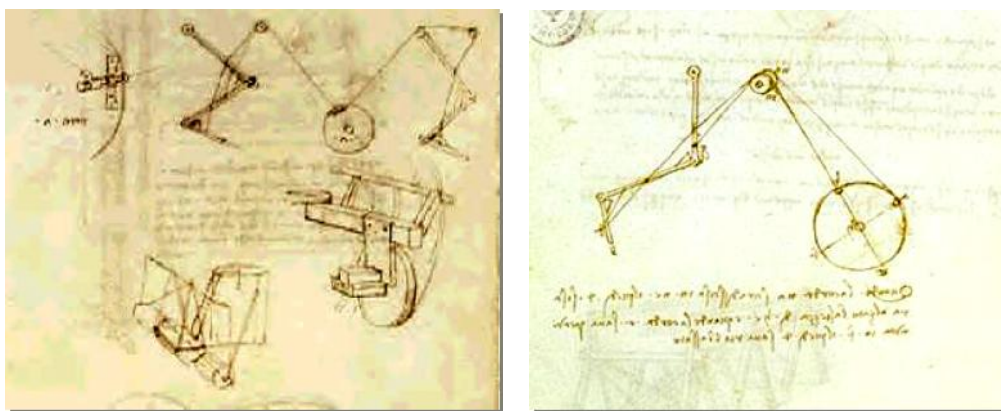


Figura 1. Schițe de mecanizări ale lui Leonardo da Vinci

Sursa: [125]

Însă, cuvântul „**ROBOT**” a apărut pentru prima dată în 1920 în cartea R.U.R (*Rossum's Universal Robots*) a scriitorului cehoslovac Karel Kapek. Cuvântul derivă din limba cehoslovacă, în care **ROBOTA** se referă la muncitori sau șerbi (țărani). În mod tipic pentru literatura science-fiction din acele vremuri, roboții preiau conducerea și extermină rasa umană [114].

Primul robot programabil apare în anul 1954, creat de George Devol [115], care crează totodată și termenul de „**Universal Automation**”. Apoi, prescurtează termenul, acesta devenind „**Unimation**”, care va fi ulterior și numele primei companii de producere a roboților (1962) [115].

A urmat apoi popularizarea cuvântului ROBOT de către binecunoscutul scriitor Isac Asimov [113], în multiplele sale povestiri și nuvele science-fiction. Asimov a fost astfel un vizionar care a anticipat deja în anii 1930 creierul bionic pentru controlul roboților. Trebuie de remarcat faptul că

anticiparea lui Asimov a avut loc cu câteva decenii înainte chiar și de apariția computerelor. Spre deosebire de roboții anteriori din literatură, roboții lui Asimov nu amenințau umanitatea, chiar din contră [113]. Funcționau după cele trei legi ale roboticii premature:

- un robot nu poate prejudicia o persoană umană, sau, prin neintervenție, să permită ca unei ființe omenești să i se facă un rău;
- un robot trebuie să se supună ordinelor date de către o ființă umană, atât timp cât ele nu intră în contradicție cu Legea 1;
- un robot trebuie să-și protejeze propria existență, atât timp cât acest lucru nu intră în contradicție cu Legea 1 sau Legea 2.

Prima lege a fost introdusă în povestirea timpurie a lui Asimov Liar (1941). Asimov l-a creditat pe John W. Campbell cu formularea celor trei legi, într-o conversație din decembrie 1940; Campbell însă a simțit că legile erau deja implicate în poveștile anterioare ale lui Asimov, începând cu Strange Playfellow (septembrie 1940) și Robbie (1939) [113].

În final, mulți ani mai târziu, Asimov a adăugat și cea de-a patra lege, care de fapt a devenit Legea 0, prin care lumea dă responsabilități depline roboților. Legea 0 de fapt declară că „Un robot nu are voie să facă vreun rău umanității sau să permită prin neintervenția sa ca umanitatea să fie pusă în pericol” [113].

Ca urmare a Legii 0, celelalte legi se vor modifica întocmai. Legea 0 era deja implicită în The Evidable Conflict (1950), însă Asimov avea să o formuleze explicit abia în 1985, în Robots and Empire [118].

John Sladek, cel care a parodiat echivocitatea celor trei legi în Broom Force (1972), a introdus un robot genial, dar diabolic, ale cărui “circuite asimoviene” se prăbușesc, la fel ca în personajul din Tik-Tok. Un personaj din filmul Repo Man (1984) spune că misiunea lui este cea de a reintra în posesia mașinilor fără a le produce vreo daună, parodiind astfel Prima Lege [116].

Creatorii primilor roboți industriali sunt Joseph Engleberger și George Devoe. Compania lor a construit primul robot industrial, „PUMA” (Figura 2) (Programmable Universal Manipulator Arm) [117].

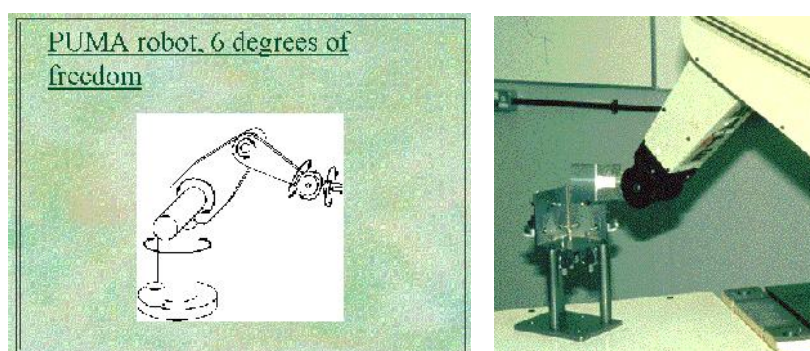


Figura 2. Brațul robotic PUMA
Sursa: [124] [128]

Odată cu anii 1980, industria roboților cunoaște o dezvoltare rapidă. Multe instituții introduc astfel cursuri și programe de specializare în robotică. Cursurile de robotică sunt imediat introduse ca discipline în cadrul specializărilor inginerie mecanică, inginerie electrică și știința calculatoarelor.

Robotica devine astfel o disciplină de știință și tehnologie ce include proiectarea, producția și utilizarea tuturor facilităților. Cunoștințe necesare pentru aplicare în robotică provin din domeniul mecanic, științei materialelor, electronic cât și al programării calculatoarelor.

Ca în seria manga japoneză scrisă și ilustrată de Osamu Tezuka din 1952 până în 1968, numită "Astro Boy", cu numele său inițial „Atom Mighty”, lumea a fost clasificată în două categorii, care sunt lumea oamenilor și, de asemenea, lumea roboților. În această poveste, lumea robotică acționează ca un partener nelipsit din viața de zi cu zi, intervenind adesea pentru sprijinirea omenirii. Prin viziunea poveștii Astro Boy, nu este imposibil ca oamenii să conviețuiască în vecinătatea roboților pentru totdeauna [119].

Definirea roboților este foarte largă și s-a făcut în numeroase feluri. Părintele primului robot industrial, Joseph Engleberger [121], a declarat că nu se poate defini cu exactitate semnificația roboților. În schimb, acesta poate identifica însă orice robot odată ce l-a văzut.

Alan Mackworth, Directorul Laboratorului de Inteligență Computațională a Universității British Columbia și Președintele Asociației Americane de Inteligență Artificială a definit robotul ca fiind o mașinărie ce poate simți, acționa și reacționa cu mediul înconjurător conform cu comenzile primite sau în mod autonom [120].

Pentru a clarifica, robotul este un dispozitiv mecanic, electro-mecanic și biomecanic care poate efectua activități fizice, care acționează utilizând supravegherea și controlul uman sau prin utilizarea unui program care a fost instalat inițial. Roboții sunt de obicei utilizați pentru locuri cu condiții de muncă grele, periculoase, mai puțin igienice, sau chiar repetitive. Cei mai mulți din roboții industriali sunt utilizați însă în producție. În plus, roboții sunt de asemenea utilizați pentru manipularea deșeurilor toxice, explorări subacvatice sau chiar spațiul cosmic, minerit, misiuni de căutare și salvare etc. În ultima vreme, robotul a ajuns să penetreze și piața de divertisment, apărând deja robotul intern (domestic), cu funcții de aspirator sau mașină de tuns iarba.

Caracteristica de bază a unui robot tipic este ușor de identificat. Una dintre proprietățile evidente este că este o mașină ce înglobează o serie de componente electrice și electronice. Are capacitatea de a interacționa atât cu mediul înconjurător cât și cu obiecte fizice. Datele privitoare la interacțiune sunt prelucrate de programatoare electronice, astfel că robotul va putea efectua anumite acțiuni până la finalizarea întregii sarcini adoptate. Robot, de asemenea, are posibilitatea de a primi, citi și identifica informații privitoare la mediul înconjurător, inclusiv obiecte fizice. Caracteristicile esențiale care se pot evidenția sunt simțurile sale, mișcarea, energia, și, de asemenea, inteligența sa.

Referitor la senzorică, robotul are capacitatea de a simți împrejurimile sale. Simțurile pentru un robot sunt aplicate după modelul simțurilor umane. De exemplu, senzori de lumina îndeplinesc funcțiile vederii umane, senzori tactili simt ca mâinile omenesci, simțuri chimice sunt analoage nasului uman, sonarul replică auzul oamenilor etc. Acești senzori pot culege pentru robot informații despre împrejurimile în care se situează. Pentru o circulație propice a robotului, aceste informații sunt esențiale. Mișcarea se poate realiza prin propulsie cu ajutorul pistoanelor, mersul pe picioare sau chiar de rulare pe roți. Robotul este considerat ca aflat în mișcare nu numai atunci când își deplasează tot corpul, ci și în cazul mișcărilor parțiale.

Un robot modern în prezent posedă un sistem numit sistemul senzorial, care acționează tocmai pentru a colecta informații privitoare la împrejurimile în care se situează acesta și le trimite la „creier”. Creierul robotului este de fapt ceea ce se numește inteligență artificială (AI). Aceasta ajută robotul să gândească și să ia decizii bazate pe informațiile obținute.

Clasificarea roboților moderni funcție de rolul acestora îi împarte în roboți mobili, industriali, roboți pentru servicii, roboți modulari și roboți colaborativi. Roboții mobili sunt acei roboți care nu își desfășoară activitatea într-un singur loc, și au capacitatea de a se muta în apropierea împrejurimilor sale. Vehiculul ghidat automat (AGV) este unul dintre exemplele de roboți mobili care sunt utilizați în zilele noastre. Acesta utilizează lasere pentru a urmări diferenți marcatori sau fire, astfel încât acestea pot fi folosite ca ghidaje pentru deplasare.

Roboții industriali, sunt oarecum diferiți de roboții mobili, chiar dacă aceștia sunt, de obicei, fixați la o locație unică. Aceștia, chiar dacă sunt imobili, au diferite ansamble sau părți componente dinamice. Corpul și părțile roboților industriali sunt formate din manipolatoare multi-ax sau brațe articulate, finalizate cu prehensoare ca efectori finali.

Subiecte referitoare la roboți, în special cei industriali, se pot elabora și dezbate mai pe larg, dar nu fac în mod special subiectul acestei lucrări. Lista de tipuri de roboți este în continuă creștere, datorită dezvoltării tehnologice masive a domeniului Robotică. Aerobot, Cyborg, Gynoid, Hexapod, Prostetic Robot, Snakebot, Microbot, Nanobot, Rover [21], sunt numai câteva tipuri de roboți autonomi, semi-autonomi sau controlați uman, roboți industriali, nano-roboți, sau tipuri de roboți umanoizi, funcționând după schema din Figura 3.

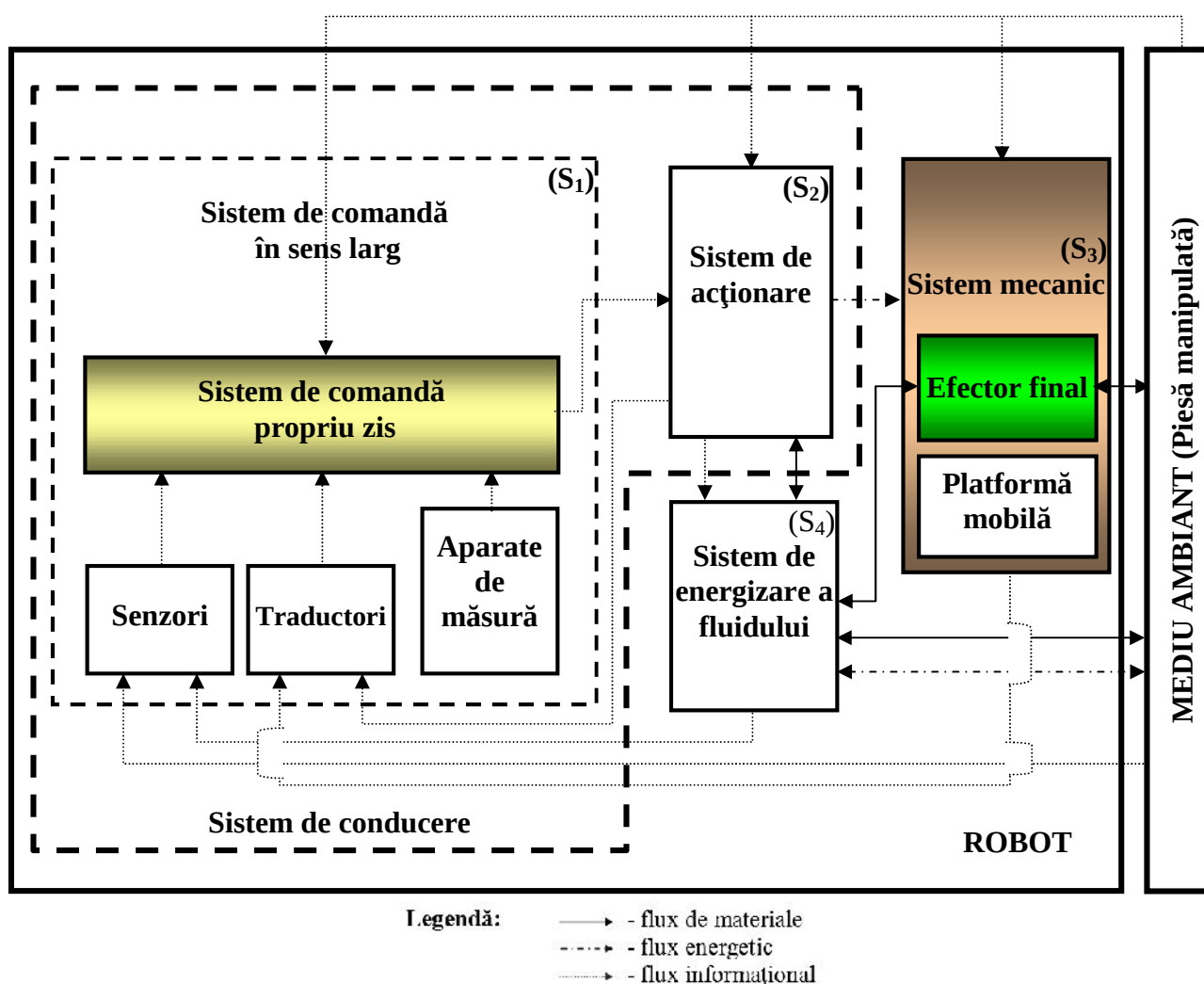


Figura 3. Schema structural - funcțională a robotului
Sursa [21]

Sistemul de comandă propriu-zis al robotului prelucrează informațiile despre:

- starea mediului, starea externă a robotului, caracterizată prin parametrii mediului (temperatură, presiune, compoziție etc.) și acțiunea acestuia asupra robotului (forțe, cupluri etc.);
- starea internă a robotului, caracterizată prin deplasări, viteze, accelerații relative, debite, presiuni, temperaturi etc.

Totodată, sistemul de comandă emite, în conformitate cu aceste informații și propriul său program, corespunzător funcției pe care o are, comenzi către sistemul de acționare. Ca urmare, sistemul de comandă propriu-zis are funcția creierului uman.

Sistemul de comandă în sens larg al robotului cuprinde, pe lângă sistemul de comandă propriu-zis și mijloacele tehnice prin care se culeg informațiile: senzorii pentru informații care nu sunt legate de deplasări (provenite din mediu înconjurător), traductoarele, pentru informații legate de deplasări (provenite în special din subsistemele robotului), ca și aparatele de măsură specifice unei instalații de teleoperare. Ca urmare, sistemul de comandă în sens larg al robotului are funcția sistemului nervos uman (Figura 3).

Sistemul de comandă și sistemul de acționare constituie subsisteme ale sistemului de conducere al robotului. Sistemul de conducere al robotului are atâtea axe energetice și axe de reglare câte elemente de acționare a cuplurilor cinematice conducătoare ale mecanismelor are sistemul mecanic.

Se înțelege prin "mediu" al robotului spațiul în care acesta evoluează, cu obiectele conținute și fenomenele care au loc în acest spațiu. Totalitatea obiectelor cu care robotul interacționează constituie "periferia" acestuia.

Legăturile dintre componentele robotului, respectiv ale acestora cu mediul pot fi directe sau inverse ("feed back").

Comenzile transmise de sistemul de comandă sistemului de acționare, care acționează cuplurile cinematice conducătoare ("axe" sistemului mecanic) prin "*actuatori*", care la rândul său acționează asupra mediului (prin "*efector final*"), constituie legături directe.

Informațiile furnizate sistemului de comandă de către traductoare, senzori și aparate de măsură constituie legături inverse.

În cazul sistemelor de acționare hidraulice, respectiv pneumatice (dacă nu se alimentează din rețeaua de aer comprimat), deci a acelor ce folosesc ca purtător de energie un fluid, robotul conține și un sistem de energizare a fluidului (având ca și componente constitutive un grup hidraulic sau un compresor). Acest sistem are funcțiile corespunzătoare aparatelor respirator, digestiv și circulator ale omului.

Legăturile dintre sistemele componente ale sistemului robot se realizează prin fluxuri (Figura 3), și anume:

- flux de informații:
 - mediu, sistem mecanic, sistem de acționare, sistem de energizare a fluidului → sistem de comandă;
 - sistem de comandă → sistem de acționare;
 - mediu → sistem de comandă;
- flux de energie:
 - sistem de acționare → sistem de comandă;

- sistem de acționare → sistem mecanic, sistem de energizare a fluidului;
- flux de materiale:
 - mediu ambiant → sistem de energizare a fluidului;
 - sistem de energizare a fluidului, sistem mecanic → mediu ambiant;
 - sistem de energizare a fluidului → sistem de acționare, sistem mecanic;
 - sistem de acționare, sistem mecanic → sistem de energizare a fluidului.

Structura constructivă (modulară) a robotului evidențiază modalitatea de materializare a lui din punctul de vedere constructiv. În caz general, structura constructivă a robotului nu se necesită să fie antropomorfă (excepție, roboții cu "arhitectură antropomorfă").

Sistemele constructive componente ale sistemului robot (sisteme de rang R) se numesc module (sisteme de rang R-1).

1.2. Scopul și obiectivele tezei

Scopul principal al acestei teze constă în dezvoltarea (proiectarea, realizarea și testarea) unui produs de înalt nivel tehnologic care încorporează gândire inovativă în domeniu, alături de dezvoltarea cunoștințelor referitoare la funcționarea aliajelor cu memoria formei, acționarea acestora și controlul histerezisului termic, respectiv un dispozitiv de prehensiune (DP) acționat de un actuator cu elemente active din aliaje cu memoria formei..

Un rol important îl constituie elaborarea modelului matematic, care să descrie cât mai amănunțit comportarea neliniară a funcționării aliajului cu memoria formei utilizat, model ce a constituit suportul simulării numerice și funcționale, simulare validată prin măsurătorile efectuate pe standul de probă experimental. Modelul de actuator propus este conceput în construcție relativ compactă și foarte simplă, având o conectare facilă atât cu mecanismul cu bare articulate acționat cât și cu sistemul de alimentare, monitorizare și control, acționarea fiind determinată de revenirea la forma și dimensiunea memorată a arcurilor active din structura actuatorului.

Contribuțiile tezei la dezvoltarea cunoașterii în domeniu s-au concretizat prin introducerea unei noi metode inovative de monitorizare și control a elementelor active ale actuatorului, care conduce la creșterea performanței DP prin dezvoltarea unei forțe relativ mari concomitent cu o deplasare substanțială. De asemenea conceperea, dezvoltarea și aplicarea unor metode de investigare științifică atât pe cale numerică cât și experimentală, având la bază cerințe standardizate europene pentru asigurarea gradului de precizie la nivelul de încredere stabilit și validarea metodelor statistice și probabilistice pentru evaluarea rezultatelor.

Teza a urmărit dezvoltarea unor activități de cercetare, dezvoltare și inovare privind domeniul dispozitivelor de prehensiune prin utilizarea aliajelor cu memoria formei pentru generarea mișcării și, în special, proiectarea, construcția și validarea funcțională a actuatorului DP pe baza ultimelor tendințe tehnologice apărute pe plan național și mondial, tehnologii cu un mare potențial de aplicare pentru realizarea acestor deziderate (în special din punct de vedere calitativ). Totodată, s-a urmărit realizarea de cercetări conforme cu ultimele obiective strategice precizate atât în Platformele Tehnologice Europene cât și în cea națională prin aspectele abordate referitoare la acționarea, poziționarea, transferul termomecanic, forța de prehensiune, durata de viață, și nu în ultimul rând, nevoia de miniaturizare a actuatorilor.

Obiectivul general al tezei a fost atins prin proceduri de procesare, proiectare și execuție în vederea obținerii unei viziuni cât mai complete asupra funcționării DP acționat de actuatori cu elemente active din aliaje cu memoria formei, de a stabili o platforma de abordare coerentă și interdisciplinară a tendințelor actuale în cercetarea și dezvoltarea actuatorilor cu elemente active din aliaje cu memoria formei și implementarea acestora în modulul de prehensiune al robotului industrial. Abordarea a urmărit prioritar următoarele probleme organizate în clustere de competență cum sunt acționarea, monitorizarea, controlul, poziționarea, transferul termomecanic și durata de viață în timpul funcționării actuatorului dezvoltat, precum și proiectarea, cercetarea, dezvoltarea, construcția și validarea unui model funcțional. Cercetările efectuate în vederea realizării scopului propus s-au dezvoltat după ipoteze de lucru clare, care au ajuns să devină obiectivele acestei lucrări.

Obiectivele specifice ale tezei, subordonate obiectivului general sunt:

- analiza stadiului actual al problematicei mecanismelor prehensoare și al aliajelor cu memoria formei pe baza unei documentări ample de specialitate
- dezvoltarea unui model matematic care să descrie cât mai exact comportarea neliniară a aliajelor cu memoria formei la transformarea reversibilă austenită - martensită, utilizat ulterior ca suport pentru o simulare dinamică a procesului sus-amintit;
- obținerea unui sistem de monitorizare al temperaturii de acționare și al forței de prehensiune dezvoltate de actuator;
- obținerea unui sistem inteligent de control și comandă al întregului modul de prehensiune, ce înglobează senzori pentru măsurarea forței dezvoltate și a deplasării realizate, capabil să satisfacă necesitățile de funcționare și precizie;
- proiectarea, execuția, cercetarea experimentală precum și optimizarea constructivă și funcțională a modulului de prehensiune acționat de un actuator cu elemente active din aliaje nichel-titan.

1.3. Structura tezei

Noutatea și caracterul interdisciplinar complex al problemei abordate au necesitat și totodată au impus tratarea a numeroase aspecte, atât teoretice cât și aplicative.

Modalitatea de prezentare a noțiunilor este de asemenea în concordanță cu tendințele globale actuale, identificate în peste cele 130 de referințe bibliografice, din care, peste 25 cărți și peste 70 lucrări științifice și teze de doctorat.

Astfel, teza de față a fost concepută astfel încât să permită distingerea cu claritate a elementelor fundamentale, precum și dezvoltarea unei metodologii pentru atingerea obiectivelor propuse, fiind structurată pe 6 capitole, după cum urmează:

Capitolul 1 cuprinde o scurtă introducere în tematica lucrării, formularea scopului, al obiectivului general și a obiectivelor specifice tezei, precum și modul de structurare al prezentei lucrări, finalul capitolului prezentând concluziile referitoare la acest capitol.

Capitolul 2 cuprinde o analiză a stadiului actual al cunoașterii atât în domeniul DP robotice cât și al aliajelor cu memoria formei, bazată pe o documentare vastă de specialitate, în vederea evidențierii în mod comparativ al rezultatelor obținute în domeniu. Prin urmare, au fost parcurse

selectiv și studiate, categorii de documente bibliografice, cum ar fi documentații de referință cu caracter de reglementare, articole sau rezultate ale cercetărilor publicate marea lor majoritate din ultimii patru ani, capitole speciale sau de specialitate din cărți publicate de edituri consacrate în domeniul de interes. În principiu, s-au putut individualiza în mod adecvat metodele existente referitoare la structura și comportamentul prehensorilor robotice și al aliajelor cu memoria formei, metode de optimizare a acționării actuatorilor, în special a celor cu elemente active din materiale cu memoria formei și posibilele modalități de implementare.

După un scurt istoric al dispozitivelor de prehensiune, sunt reliefați parametrii constructivi și funcționali ai efectorilor finali, clasificarea acestora și scheme structurale reprezentative. S-au prezentat de asemenea atât câteva tipuri de actuatori clasici cât și forme existente de actuatori cu elemente din AMF. Au fost apoi prezentate aspecte importante care sunt reflectate de gradul de implicare al aliajelor cu memoria formei în multiplele aplicații din domenii diverse, cum sunt medicina, aeronautica, robotica, instalații și echipamente de fabricare a unor componente din domeniul electric, electronic, automatizări, mecanică etc., încheind totodată prima parte a lucrării, partea de stadiul actual al cunoașterii. S-a conceput schema structurală ce va fi supusă cercetării. Concluziile și contribuțiile autorului sunt prezentate la sfârșitul capitolului.

Capitolul 3 este dedicat analizei parametrilor constructivi și funcționali ai actuatorilor cu elemente active din aliaje cu memoria formei pentru dispozitivul de prehensiune. Prima parte a capitolului prezintă criteriile conform cărora au fost selectate materialul de execuție și forma geometrică a elementelor active din AMF, toate acestea bazate pe un calcul laborios de dimensionare al acestora. Totodată, sunt prezentate rezultatele experimentale obținute în urma testării elementelor proiectate. Partea a doua a capitolului descrie câteva variante constructive novative de actuatori ce se pot integra în construcția modului de prehensiune, metodologia dezvoltată pentru validarea experimentală precum și parametri funcționali obținuți pe cale experimentală ai variantei optime de actuator cu arcuri active din AMF. Finalul capitolului prezintă concluziile desprinse în urma cercetărilor efectuate.

Capitolul 4 cuprinde atât partea de modelare a prehensiunii mecanice cât și simularea funcționării prehensorului, simulare efectuată cu ajutorul unor programe software dedicate (Catia și Solid Works). În debutul acestuia este realizată o modelare matematică a efectului de memorie a formei, modelul obținut fiind necesar pentru alegerea formei geometrice a elementelor din AMF ce urmează a fi utilizate în construcția actuatorului. Datorită tipologiei structurale diferite a actuatorului acționat de resorturi active din aliaje Ni-Ti, trebuie formulat un model de analiză cu element finit adecvat, care să vină în întâmpinarea cerințelor de construcție, optimizare și funcționalitate. În partea a doua a capitolului este dezvoltată o amplă analiză structurală a două tipuri de DP propuse (paralel și unghiular), influența tipologiei geometrice a DP asupra funcționării acestora, analiză ce vizează totodată și gradul de mobilitate al mecanismului pentru determinarea desmodromiei. Analiza cinematică a avut ca scop analiza poziționării și orientării elementelor, determinarea preciziei de poziționare precum și determinarea vitezelor și accelerațiilor ce apar în timpul funcționării.

Analiza cinetostatică a celor două soluții constructive alese a urmărit totodată stabilirea forțelor și tensiunilor ce apar în cuplurile și elementele corespunzătoare. Pentru analiza comportării dinamice s-au impus deplasări cu evoluții după funcții cunoscute elementelor din aliaje cu memoria

forme pentru a se obține o mișcare controlată a elementului conducător al DP, care, la rândul său, să producă o deplasare corespunzătoare.

Capitolul 5 prezintă în detaliu dispozitivul de prehensiune proiectat, construit și folosit în cadrul cercetării, evidențiind particularitățile constructive ale acestuia, alături de o analiză riguroasă a avantajelor și dezavantajelor utilizării lui, toate acestea bazate pe încercările experimentale efectuate. Astfel, este prezentat modul de execuție al modulului de comandă al elementelor active și modul de monitorizare a parametrilor, standul experimental servind totodată pentru validarea rezultatelor obținute în urma simulării funcționării atât a actuatorului cât și a întregului dispozitiv de prehensiune. Încălzirea elementelor active din aliaje cu memoria formei pentru acest model de actuator se face prin conducție electrică directă, răcirea fiind executată atât forțat, cât și liber prin insuflarea unui curent de aer, această modalitate fiind de un real folos pentru a învinge inerția termică.

În **Capitolul 6** sunt prezentate concluziile finale, contribuțiile originale ale autorului, valorificarea și diseminarea rezultatelor cercetării teoretice și experimentale efectuate de-a lungul celor 9 ani cât și posibilele dezvoltări viitoare ale acesteia.

Figura 4 prezintă schematic modul de structurare a lucrării.

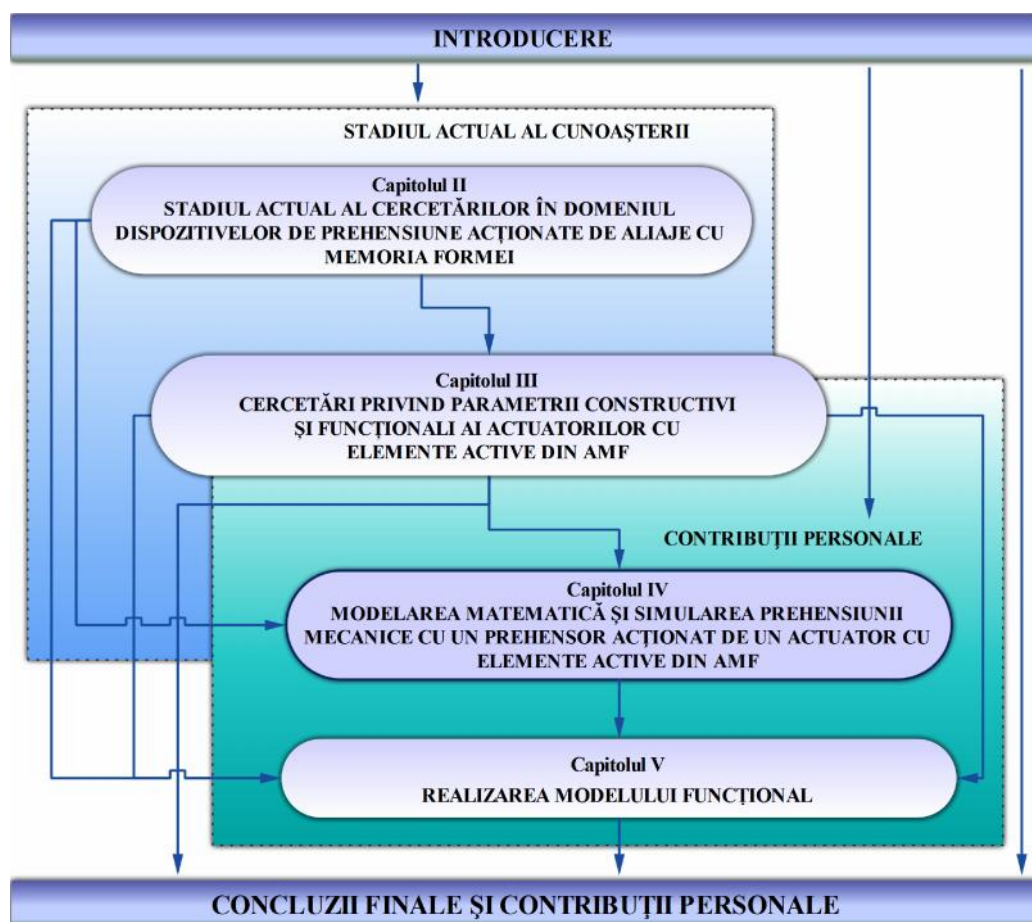


Figura 4. Structurarea lucrării și interdependențele dintre capitole

1.4. Concluzii

Tema lucrării este o temă cu o abordare interdisciplinară, fiind o temă de actualitate care reprezintă un domeniu vast, domeniul roboticii, vizând în mod special dezvoltarea unui sistem de prehensiune acționat de un actuator novativ ce include elemente active din aliaje cu memoria formei, proiectarea și execuția unui nou tip de actuator care vizează înlocuirea actuatorilor existenți din componența actuală a DP robotice, actuatorul novativ construit având avantajul de a putea dezvolta o forță de lucru mare concomitent cu o deplasare relativă ridicată, fiind realizat însă într-o singură variantă constructivă.

În lucrare se întrepătrund cercetări ce implică cunoștințe din domeniul mecanicii (proiectarea și realizarea dispozitivului de prehensiune) cu cele din domeniul științei materialelor (studiul materialelor inteligente, comportarea acestora, proiectarea și realizarea arcurilor active din Nitinol) și cele din domeniul automatizării (proiectarea și acționarea sistemului de senzoric de monitorizare și control al actuatorului), dar o dezvoltare completă a tuturor acestora este practic imposibil de realizat într-o singură lucrare.

Capitolul începe cu o scurtă introducere în problematica abordată. Apoi, se expun anumite aspecte ce conduc spre scopul final a capacității constructive a tuturor roboților, a brațelor robotice și, în special, al prehensorilor robotici, respectiv compactitate coroborată cu ușurință în comanda și controlul acestora pentru obținerea unei eficacități maxime.

După introducerea în problematica abordată, sunt prezentate atât scopul lucrării cât și cele 5 obiectivele specifice propuse pentru a fi atinse, urmate de prezentarea structurării tezei, parte ce cuprinde o scurtă descriere a fiecărui din cele cinci capitole componente ale tezei.

2. CAPITOLUL II. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL DISPOZITIVELOR DE PREHENSIUNE ACȚIONATE DE ALIAJE CU MEMORIA FORMEI

2.1. Scurt istoric al dispozitivelor de prehensiune

Ce reprezintă un robot fără braț sau alt mod cu care poate să apuce și să deplaseze obiecte? Nu prea mare lucru. Tehnic, roboții există de mai bine de 100 de ani. Mișcarea lor mecanică este relativ ușor de generat, în special dacă se utilizează motoare electrice, pneumatice sau hidraulice. În aproximativ ultimii 40 de ani s-au dezvoltat în mod considerabil precizia mișcării, controlul și senzorialitatea, toate acestea conducând în prezent la o totală indispensabilitate a roboților [19].

Proiectarea și construcția brațelor robotice cu o dexteritate cât mai ridicată a constituit o preocupare majoră pentru mediile academice, de cercetare și de dezvoltare în ultimele două decenii. Multe din brațele robotice au avut ca scop îmbunătățirea permanentă a gradului de dexteritate pentru a face față în cele mai complexe situații, acest fapt însă având ca urmare reducerea eficacității pentru anumite tipuri de aplicații.

Robotica este un domeniu al științei și tehnicii relativ nou, cu o rapidă dezvoltare, legat de realizarea și folosirea roboților și a sistemelor tehnice. Robotica a apărut ca ramură științifică de sine stătătoare pe baza mecanicii și ciberneticii, actualmente a mecatronicii. În același timp, dezvoltarea roboticii a ridicat probleme științifice noi într-un șir de științe conexe, conducând la progresul acestora [19].

Robotul, ca obiect de bază în această știință, poate fi definit ca un automat universal pentru reproducerea unor funcții de mișcare și intelectuale ale omului. Există o serie de categorii de roboți ce dezvoltă unul sau altul din domeniile și subdomeniile funcțiilor de mai sus. Dintre acești roboți se desprinde o clasă importantă și anume aceea a roboților de manipulare. Caracteristică roboților de manipulare, din care clasă fac parte și roboții industriali, este existența elementului periferic: dispozitivul de prehensiune.

Scopul practic al introducerii roboților este acela al încărcării lor cu acele tipuri de acțiuni care pentru om sunt dificile, prezintă sarcini gravitaționale mari, sunt monotone, periculoase pentru sănătate și viață. Adică, în primul rând, la operațiile de producție auxiliare: încărcarea și descărcarea mașinilor unelte și a automatelor la operații de prelucrare propriu-zisă cu roboți industriali: sudură, vopsire, debitare, montaj etc. Utilizarea cuprinde și domeniul condițiilor de lucru așa zis extreme: sub apă, în cosmos, în medii radioactive sau otrăvitoare.

Roboții care sunt concepuți pentru îndeplinirea funcțiilor de manipulare și de comandă în cadrul proceselor productive se numesc roboți industriali. Necesitatea măririi productivității și a calității a condus la o dezvoltare rapidă în ultimele trei decenii a roboticii și a producției de roboți industriali. Cu ajutorul roboților industriali se pot rezolva problemele mecanizării complexe și a automatizării producției de masă în industrie.

Față de mijloacele clasice de automatizare, introducerea roboților industriali conduce la universalitate, posibilitatea adaptării (reglării) lor rapide la noile cerințe cu productivitate maximă și

cheltuieli minime. Caracteristicile de mai sus sunt de primă importanță în domeniul producției de serie mică și mijlocie, adică unde s-au dezvoltat sistemele de fabricație flexibilă.

Spre deosebire de majoritatea lanțurilor cinematice de bază, brațele robotice dispun de multiple grade de libertate, care trebuie sincronizate cu multă acuratețe. De aceea, totalitatea informațiilor necesare pentru a acționa un braț robotic senzitiv, care este întradevăr de un real folos, și nu doar un braț care răspunde doar comenzilor date, neținând cont de reacțiile mediului înconjurător, au reușit a fi coordonate, sintetizate și dezvoltate în urmă cu 35 de ani. Atunci a fost introdus pe piață practic primul prehensor capabil să răspundă cerințelor aplicațiilor industriale mecanizate.

Astfel, în anul 1969, după multiple experimente efectuate, Victor Scheinman, student la specializarea inginerie mecanică a Universității Stanford, a reușit să pună în funcțiune brațul robotic cunoscut și azi sub denumirea de brațul Stanford [109], primul braț robotic ce avea în componență un prehensor controlabil (Figura 5).



Figura 5. Brațul STANFORD
Sursa [123]

Spre deosebire de predecesorul său, brațul hidraulic Stanford, cunoscut ca deseori incontrollabil sau chiar periculos, noul braț s-a dovedit a fi foarte rapid și precis, având 6 grade de libertate, fiind acționat de motoare electrice de curent continuu. Mișcarea degetelor prehensorului era generată de actuatori armonici, legătura dintre motoare și actuatori fiind asigurată și controlată prin intermediul unor reductoare de mici dimensiuni.

Din punctul de vedere al prehensiunii, brațul Stanford a inclus ceva ce se numea prehensor paralel, incluzând doar două „degete” (Figura 6). Acest design omniprezent, foarte comun și în zilele noastre, constă în două elemente drepte acționate doar să se apropie sau să se depărteze pentru a prinde sau elibera obiectul prehensat [109].

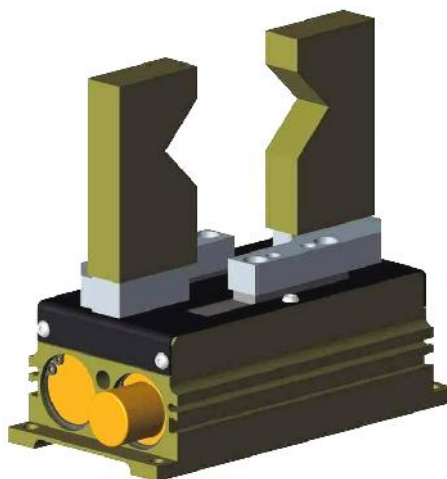


Figura 6. Prehensor paralel

Sursa: [19]

Începutul anilor 80, datorită apariției microchip-urilor, au adus numeroase variante de brațe robotice inspirate după brațul Stanford, care au început a fi introduse masiv în producție, cu o largă utilizare în special în industria grea. Multe din elementele originale ale brațului Stanford au fost copiate, dar evoluția tehnicii a condus la înlocuirea tahometrelor sau potențimetrelor de controlare pentru viteza sau poziție, majoritatea brațelor robotice industriale fiind acționate pneumatic și utilizate cu precădere în industria automotivă. O ciudată conincidență este faptul că indiferent de majoritatea îmbunătățirilor ce au apărut ulterior din domeniul hidraulicii, majoritatea actuală a DP sunt acționate pneumatic.

O variație a acestui prehensur, respectiv cea cu două degete articulate, a apărut la finele anilor 1970. Noutatea a constatat în faptul că fiecare din cele două degete ale prehensurului se puteau roti în jurul unui punct, închizând ca și un clește obiectul de prehensat. Diferența dintre prehensurul paralel și cel unghiular constă în faptul că prehensurul paralel simplifică oarecum construcția degetelor prehensurului, iar forța dezvoltată este constantă de-a lungul degetelor, lucru care este diferit la prehensurul unghiular cu două degete. Totodată, din compararea prehensurului paralel cu cel unghiular, rezultă două caracteristici distincte, și anume:

- fiind acționate direct de către actuator (un piston hidraulic), au putut dezvolta o forță de prehensiune ridicată (până la 44,5 kN);
- prin comparație, prehensurul unghiular cu degete articulate, a oferit în schimb dezvoltarea unei forțe de prehensare mai mică, dar deplasarea degetelor a fost însă mult superioară (până la 61 de cm).

Un comentariu de la acea vreme a lui Hayes menționa estimarea acestuia asupra utilizării între 60 - 70% a utilizării viitoare a prehensurilor paralele, fapt confirmat ulterior. Acționarea acestor dispozitive s-a diversificat ulterior, trecând de la acționarea hidraulică atât la cea pneumatică cât și la cea electromecanică [107].

Următoarea inovare majoră în domeniul prehensurilor a survenit abia la sfârșitul anilor 80, prin apariția unui prehensur cu trei degete, dezvoltat de Massachusetts Institute of Technology și înregistrat de către compania spin-off Barrett Technology Inc., Cambridge, Massachusetts, în anul 1990. Este vorba de prehensurul prezentat în Figura 7, cunoscut sub denumirea de „Mâna Barrett”,

prehensor ce includea deja servo-controllere, comandă software, comunicare inteligentă și patru servo-motoare (motoare fără perii) [126].



Figura 7. Brațul BARRETT
Sursa [130]

Acest dispozitiv de prehensiune ce dispune de 7 axe de mișcare, numit și WAM (Whole Arm Manipulation) se bazează pe componente electronice fabricate de firma Puck și de componente mecanice, proiectate în maniera de a interacționa direct cu factorul uman.

Dispozitivul de prehensiune Barrett (Figura 8), în ultima sa variantă, reprezintă de fapt un prehensor cu trei degete care are dexteritatea de a prehensa obiecte de forme, mărimi și orientări spațiale diferite. Este un ansamblu compact care cântărește doar 980 de grame, având baza de contact de doar 25mm. Comunicarea cu dispozitivul se asigură de către un port industrial de comunicare serial standard sau un port cu viteză ridicată CANbus (cu un adaptor USB inclus), integrarea acestuia în componența unui braț robotic fiind posibilă într-un mod foarte rapid și cu multă ușurință.



Figura 8. Dispozitivul de prehensiune inteligent BARRETT
Sursa [133]

În acest mod, prehensorul se poate adapta evident foarte ușor prin flexibilitatea automatizării de care dispune oricărui braț robotic în a cărui componență urmează a fi integrat. Brațul Barret încorporează astfel într-un mod compact componentele utilizate pentru comunicare, servo-controller-ele și motoarele utilizate pentru acționarea și poziționarea degetelor sale. Din cele trei degete multi-articulate, două dintre acestea au adțional un grad de libertate, grad oferit de posibilitatea mișcării acestora în plan lateral cu o mobilitate de 180 de grade. Această mișcare

suplimentară a celor două degete multi-articulate conferă posibilitatea unor multiple tipuri de prehensare pentru dispozitiv. Fiecare articulație a fiecărui deget este controlată de asemenea de traductori de poziție foarte preciși [126].

Prehensorul Barrett este acționat de un soft dedicat, construit special pentru acest prehensor, numit BarrettHand™ Software, soft a cărui cod sursă împreună cu câteva exemple, este livrat odată cu achiziționarea dispozitivului de prehensiune.

Acest soft de comandă poate rula atât sub Windows cât și sub Linux, având o interfață grafică prietenoasă și ușor de utilizat (GUI), prezentând toate funcționalitățile care pot fi executate de prehensor, fără a obliga utilizatorul la scrierea nici unui cod. Fereastra de control vizual permite funcționarea interactivă a dispozitivului, asigurând totodată controlul în timp real asupra acestuia.

Făcând o comparație între cele două prehensoare prezentate anterior, chiar dacă prețul prehensorului Barrett este mai ridicat, abilitatea complexă de prehensare a gripper-ului Barrett cât și capabilitatea de a schimba mult mai rapid orice sculă ce urmează a fi utilizată îl fac să fie de departe preferat pentru aplicații uzuale.

Demn de menționat este și faptul că în prezent, Barrett fabrică și operează produsele sale în peste 20 de țări din 6 continente. Firma este prezentată de The Guinness Book of World Records, Millennium Edition ca fiind producătorul celui mai avansat braț robotic [104].

O aplicație a acestui prehensor, într-o versiune recentă, adaptată cu toate ultimele ale cuceriri ale tehnologiei actuale este fabricată și distribuită de către MAKO Surgical Corp., versiune ce permite operații chirurgicale ghidate haptic cu implicații invazive minime.

Un alt dispozitiv de prehensiune care a încercat să copieze cu cât mai multă acuratețe brațul uman, având astfel cu adevărat o abordare antropomorfică, este prezentat în Figura 9, respectiv mâna Shadow (Shadow Hand) [132].



Figura 9. Prehensorul SHADOW
Sursa [133]

Mâna robotică Shadow are active 20 de grade de libertate și poate efectua încă 4 mișcări cu toate cele 24 de articulații de care dispune. Fiecare articulație dispune de o rază de mișcare foarte apropiată sau chiar identică cu mâna umană, incluzând aici atât degetul mare cât și flexarea palmei pentru mișcarea degetului mic [132].

Prehensorul Shadow a fost gândit și construit ca fiind un apogeu a miniaturizării. Având exact aceleași dimensiuni ca și mâna umană, a fost echipat cu degete super-senzitive, senzori de poziție pentru fiecare articulație și o placă de control inclusă în structura palmei care permite

extinderea sistemului. Aceasta crește capacitățile operaționale în mod semnificativ, efect similar obținut prin purtarea de mănuși de protecție standard pentru diferite sarcini specifice.

Cei 129 de senzori de mișcare asigură o telemetrie perfectă a mâinii, fapt ce poate fi exploatat în vederea generării unui sistem de control manipulari inovative sau o percepție detaliată a mediului înconjurător. De asemenea, mâna este echipată și cu senzori pentru măsurarea forței în fiecare articulație, pentru fiecare actuator în parte și în vârful fiecărui deget. Totodată, mâna este capabilă să simtă diferite temperaturi sau diferenți curenți electrici, toate aceste date fiind transmise într-o bandă de frecvență de la 100Hz până la 1KHz unei interfețe EtherCAT. Acest fapt conduce la o manevrabilitate foarte rapidă a mâinii, durata unui ciclu al palmei deschis-închis fiind de 0,5 secunde.

Un alt aport important adus de mâna Shadow este faptul că se fabrică în două variante, câte una pentru fiecare mână (atât dreapta cât și stânga), amândouă varinate putând fi integrate la orice tip de robot existent. (Kuka, ABB, Denso, Willow Garage, Mitsubishi sau Universal Robots). La cerere, mâna poate fi personalizată pentru orice aplicație în funcție de cereri mai speciale ale utilizatorilor.

Colaborarea cu SynTouch LLC a condus la capabilități senzoriale tactile datorită dezvoltării unui nou tip de senzor tactil numit BioTac. Acest senzor se poate atașa oricărui deget, dar are avantajul de a putea simți în același timp forța, temperatura și micro-vibrațiile [133].

Mediul GSC face posibilă utilizarea mâinii ca un manipulator avansat în aproape orice situație. Bazat pe un nor de puncte 3D, prin aplicarea unui algoritm ce utilizează segmentarea, funcție de alegerea obiectului de manipulat, este aplicat un algoritm de recunoaștere pentru a putea selecta forma acestuia dintr-o bază de date deja existentă. În cazul unei recunoașteri rapide, se aplică un procedeu de prindere deja cunoscut. În cazul în care caracteristicile de formă a obiectului manipulat nu se regăsesc în baza de date, se construiesc câteva scenarii posibile de prindere pe baza unei rețele de puncte 3D din norul de puncte creat. Apoi, sistemul GSC selectează varianta optimă de prindere și trece la efectuarea operațiilor necesare. Odată ce obiectul este prehensat, intervine puternicul algoritm GSC, care, prin utilizarea diferitelor capabilități tactile, rafinează prinderea obiectului, efectuând ultimele ajustări necesare unei prinderi cât mai corecte a obiectului.

Este însă de înțeles că o lucrare de asemenea anvergură nu poate prezenta și analiza toate tipurile de prehensori robotici existenți datorită multitudinii acestora, fapt ce nici nu consistă ca scop principal în lucrarea de față. S-au prezentat mai sus doar câteva dispozitive de prehensiune considerate elocvente pentru avansurile tehnice și tehnologice aduse la vremea apariției acestora.

O listă completă a dispozitivelor de prehensiune identificate și studiate se poate regăsi în tabelul din Anexa 1 a prezentei teze.

2.2. Generalități privind aspectele constructiv-funcționale ale efectorilor finali

Elementul final situat la finalul robotului industrial și care permite să-și îndeplinească funcția sa, în cadrul procesului industrial se poate denumi terminal. Terminalul poate consta într-un dispozitiv de prehensiune (DP) în cazul când obiectul de lucru este fixat (strâns), dispozitive de apucare pe alte principii (cu vid, magnetice) sau diferite dispozitive active.

Structura mecanică a roboților industriali este formată din elemente (ce pot fi considerate rigide) și cuple cinematice ce realizează legarea elementelor între ele și a primului element la batiu, (0). Dintre clasele cuplelor cinematice se utilizează, în primul rând, cuple C5 cu un singur grad de mobilitate, adică numai cuple de rotație (R) și/sau cuple de translație (T). Cuplele superioare C4 și C3 ridică atât probleme tehnologice privind preluarea jocurilor, cât și dificultăți de acționare.

Se vor considera în continuare structuri la care elementele sunt legate prin cuple cinematice inferioare. Structurile pot fi de tip lanț cinematic deschis sau lanț cinematic închis. În cazul lanțului cinematic deschis (Figura 10. a) elementele și cuplele formează o structură arborescentă (în sensul teoriei grafurilor) atunci când cuplele cinematice conectează numai două elemente din succesiunea lor ordinală. Astfel, în cazul particular al lanțului cinematic deschis neramificat din Figura 10 a, cuplele conectează două elemente în ordinea crescătoare: 12, 23, 34, ..., (i-1)i. Elementele de început și de sfârșit 1 respectiv i au numai câte o cuplă conectată, având un capăt liber. Într-un lanț cinematic închis fiecare element are cel puțin două legături la cuple.

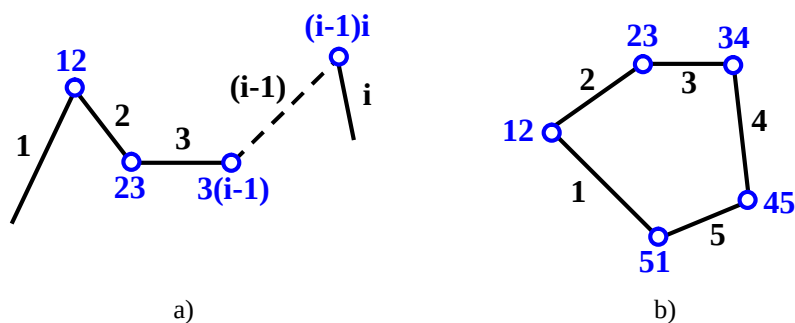


Figura 10. Lanțuri cinematice

O caracteristică a structurilor cu lanț cinematic deschis este aceea că numărul de grade de libertate este egal cu cel al cuplelor sau, altfel spus, fiecare cuplă este motoare.

Numărul total de grade de libertate (n_{GL}) al unui robot industrial este uzual $n_{GL} = 4 \dots 6$. Pentru a asigura o poziție oarecare a obiectului de lucru în spațiu, sunt necesare 6 grade de libertate ce pot fi exprimate ca trei translații pentru a conferi poziția punctului caracteristic (PC) și trei rotații pentru a realiza orientarea spațială. Punct caracteristic, este un punct real sau virtual al aplicației și poate fi centrul geometric al prinderii obiectului de lucru, un punct al sculei etc.

Este evident că numai roboții industriali ce au $n_{GL} = 6$ pot asigura poziția generală a obiectului de lucru. Ceilalți roboți industriali, de exemplu cei cu $n_{GL} = 5$, pot realiza, într-o aplicație, orice coordonate a punctului caracteristic și o orientare parțială a obiectului de lucru (orientarea numai a unei axe a acestuia) sau în altă aplicație numai o mișcare plană a punctului caracteristic și o orientare completă a obiectului de lucru (orientarea a două axe legate ale obiectului de lucru).

Caracterizarea structurală trebuie să cuprindă, pe lângă numărul total de grade de libertate și modul de realizare a acestora. Este necesar a fi cunoscute și natura cuplelor (rotație sau translație) precum și succesiunea lor. Notarea se face Începând de la batiu către efectorul final. Astfel, un robot industrial cu structura TRRRR are $n_{GL} = 5$, prima cuplă (dintre batiu și primul element) este de translație. Urmează patru cuple de rotație succesive.

În unele cazuri structura robotului industrial poate fi teoretic desfăcută în două părți:

a) mecanismul generator de traiectorie format din primele trei elemente mobile și deci și primele trei cuple. Mecanismul generator de traiectorie formează lanțul cinematic principal.

b) Sistemul de orientare (mecanismul de orientare) formează lanțul cinematic secundar și conține 2 sau 3 elemente și cuple de rotație (pentru $n_{GL} = 5$, respectiv $n_{GL} = 6$).

În Figura 11 este reprezentat un robot industrial cu $n_{GL} = 6$, în structură RTTRRR. Elementele 1, 2 și 3 formează mecanismul generator de traiectorie (MGT), iar elementele 4, 5 și 6 sistemul de orientare (SO). Această împărțire are mai mult un caracter formal legat de aspectele constructive și de acționare. Rolul mecanismului generator de traiectorie (MGT) este de a modifica poziția spațială a obiectului de lucru, iar sistemul de orientare de a conferi orientarea. În realitate aceste roluri se întrepătrund din două motive:

- punctul de referință al cuplei pronație-supinație (PÎ);
- mecanismul generator de traiectorie și punctul caracteristic (PC) nu coincid și deci rotațiile ω_I , ω_{II} și ω_{III} nu modifică doar orientarea, ci și poziția punctului caracteristic;
- orientarea este dată și de acțiunea primei cuple (ce aparține mecanismului generator de traiectorie - MGT) ce realizează rotația ω_Z în jurul axei verticale.

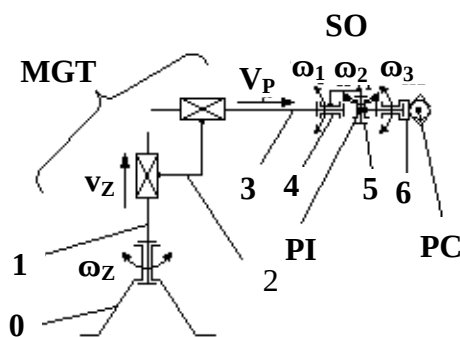


Figura 11. Schema structurală al unui robot RTTRRR

Influența sistemului de orientare asupra poziției crește atunci când axele de rotație pentru ω_I , ω_{II} și ω_{III} nu sunt toate concurente (două axe pot în majoritatea cazurilor făcute concurente).

Structura mecanismului generator de traiectorie (MGT) poate fi modificată schimbând natura și ordinea celor trei cuple. Astfel, se obțin 8 variante: TTT, TTR, TRT, RTT, RRT, RTR, TRR și RRR. O posibilă realizare spațială este dată în Figura 12. Aceste variante sunt obținute analitic, fără să se considere modificările structurii spațiale când se schimbă poziția.

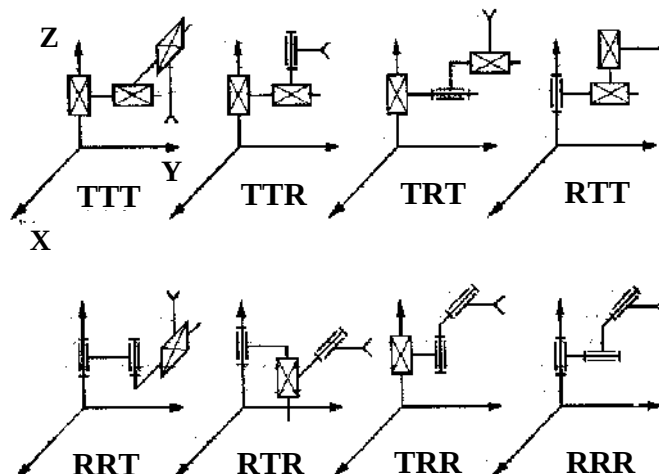


Figura 12. Variante ale mecanismelor generatoare de traiectorie

În practică sunt utilizate un număr limitat de combinații structurale pentru mecanismul generator de traiectorie (MGT). O primă reducere provine de la situația că, uzual, primul grad de mobilitate este o rotație în jurul axei verticale ω_z . Aceasta deoarece organizarea multor celule de fabricație este circulară și de asemenea s-a urmărit o unificare (limitare) a variantelor de robot industrial. De multe ori o mărire a spațiului servit se face prin introducerea hibridă a unui prim grad de libertate sub forma unei translații pe sol sau suspendate, structura de bază a roboților industriali rămânând cu rotația verticală ca primă cuplă.

Pentru simplificarea reprezentării sistemului de orientare (SO) este convențional desenat ca o cuplă sferică cu mobilitatea oarecare ω_{SO} , ceea ce corespunde unui sistem de orientare cu trei grade de mobilitate (rotații) cu axe concurente.

2.2.1. Structura și funcțiile efectorilor finali

Efectorul final este partea din sistemul mecanic al DP care realizează contactul și acționează asupra obiectului de manipulat, în conformitate cu destinația lui.

Robotul industrial are în principal două feluri de destinații: cea de manipulare a unor obiecte (de lucru, scule, capete de forță cu scule) și cea de prelucrare, montare, demontare a unor obiecte de lucru. Adaptarea robotului la o anumită destinație se realizează prin intermediul efectorului final. Flexibilitatea robotului depinde nemijlocit de efectorul final al acestuia.

Termenul de prelucrare este folosit în continuare în sens general, înțelegând prin acesta lucrul efectuat asupra obiectului. El vizează modificarea formei, a dimensiunilor, proprietățile materialului, respectiv a stării suprafețelor obiectului, structura acestuia (variabilă prin montare sau demontare).

În cazul în care robotul manipulează obiecte de lucru, cum este cazul nostru, dispozitivul de prehensiune, prin efectorul final, are rolul de a solidariza obiectul de lucru cu ultimul element al DP. Mișcările necesare manipulării obiectului de lucru se realizează prin conferirea ultimului element al DP a unor mișcări adecvate

Dacă robotul industrial are destinația de a prelucra obiecte de lucru, efectorul final este o sculă, scula fiind cea care efectuează operația de prelucrare. Ea este solidarizată cu ultimul element al brațului robotic. În acest caz scula, respectiv rolul obiectului manipulat de dispozitivul de ghidare, care le conferă mișcările necesare efectuării operației de prelucrare.

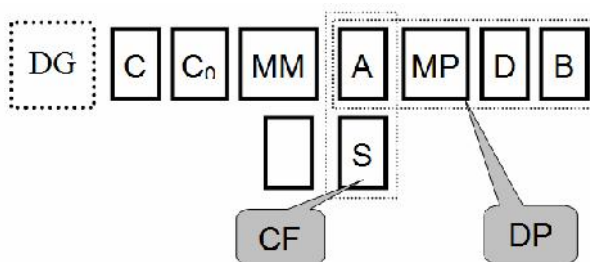


Figura 13. Schema bloc a efectorului final

Acțiunea sculei asupra obiectului de lucru se realizează prin efectuarea unui lucru mecanic util, rezultat din transformarea energiei mecanice înmagazinate în sculă. Această energie mecanică

este conferită sculei de mișcarea dispozitivului de ghidare, la al cărui ultim element este atașat. Dacă energia mecanică conferită de dispozitivul de ghidare nu este suficientă, scula este atașată unui cap de forță care îi conferă energia mecanică suplimentară. În acest scop, capul de forță este înzestrat cu un motor care transformă energia nemecanică (de obicei pneumatică sau electrică) în energie mecanică. Capul de forță este atașat la rândul său ultimului element al dispozitivului de ghidare, acesta din urmă conferindu-i posibilitatea de mișcare necesară efectuării prelucrării.

Structura efectorului final corespunde cerințelor funcționale enumerate mai sus, așa cum s-a redat în Figura 13. Efectorul final este solidarizat de ultimul element al dispozitivului de ghidare DG prin intermediul elementului de cuplare C. Elementele de complianță C_0 , respectiv modulul de mișcare MM permit realizarea unor mișcări relative de mică amplitudine ale efectorului final în raport cu ultimul element al dispozitivului de ghidare în mod necontrolat, respectiv controlat.

Dacă robotul industrial este destinat operațiilor de prelucrare, scula S se atașează la una din componentele anterior amintite fie prin intermediul unui dispozitiv portsculă fie prin intermediul unui element de acționare A. În ultimul caz, elementul de acționare împreună cu scula constituie capul de forță CF.

În varianta dispozitivului de prehensiune (DP), mecanismului de prehensiune MP se atașează elementului de acționare, având ca funcție punerea în mișcare a degetelor D care vin în contact cu obiectul de lucru prin bacurile B. Elementele A, MP, D și B constituie împreună dispozitivul de prehensiune DP.

A. Centrarea

Dispozitivul de prehensiune are funcția de a impune obiectului manipulat o situație relativă determinată în raport cu ultimul element al acestuia și cea de asigurare a menținerii în timp a acestei situații. "Modelul biologic" al DP este mâna umană. Impunerea situației relative a obiectului manipulat în raport cu un sistem de referință poartă denumirea generică de centrare.

Se disting trei trepte ale centrării: semicentrarea, centrarea și centrarea completă. Precizia de realizare a centrării se măsoară prin eroarea de centrare.

Semicentrarea unui obiect se efectuează prin suprapunerea unui plan al acestui obiect cu un plan al sistemului de axe în raport cu care se realizează semicentrarea (în cazul de față în raport cu elementul fix al dispozitivului de prehensiune). Eroarea de semicentrare este unghiul $\Delta\alpha$ format între planul aparținător obiectului și planul aparținător elementului fix al dispozitivului de prehensiune, respectiv, distanța Δl dintre aceste plane, dacă ele sunt paralele (Figura 14).

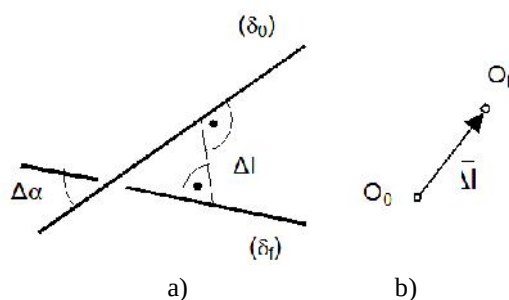


Figura 14. Eroarea de centrare (a) și eroarea de centrare completă (b)

Centrarea unui obiect impune suprapunerea unei drepte aparținând obiectului cu o dreaptă aparținând elementului fix al dispozitivului de prehensiune. Eroarea de centrare se exprimă prin unghiul de încrucișare $\Delta\alpha$ a dreptei δ_0 aparținând obiectului cu dreapta δ_f aparținând elementului fix și segmentul Δl - lungimea perpendicularei comune a dreptelor (Figura 14a).

Centrarea completă se realizează prin suprapunerea unui punct O_0 aparținând obiectului manipulat cu un punct O_f aparținând elementului fix al dispozitivului de prehensiune. Eroarea de centrare completă $\overline{\Delta l}$ este un vector al cărui punct de aplicație se găsește în O_0 (Figura 14b).

Dispozitivul de prehensiune realizează centrarea prin apropierea de obiect a degetelor și realizarea ulterioară a unor contacte ale acestora cu suprafața /suprafețele obiectului prin intermediul bacurilor. Aceste contacte "împing" obiectul (presupus inițial ca liber) în situarea relativă dorită în raport cu elementul fix al dispozitivului de prehensiune, deci în raport cu ultimul element al DP.

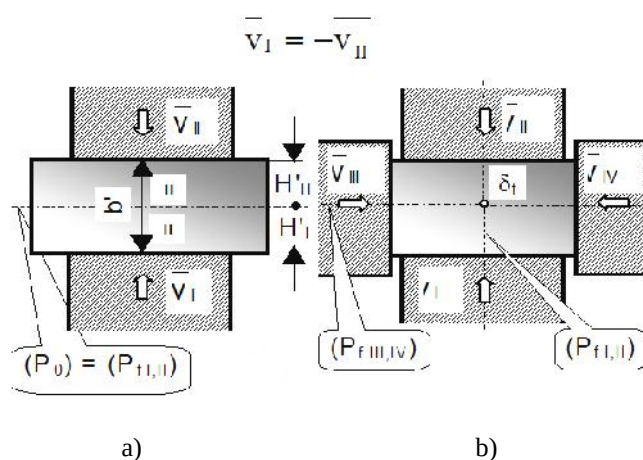


Figura 15. Semicentrarea (a) și centrarea (b) unui obiect prismatic cu 2 sau 4 bacuri

Mișcările de translație ale bacurilor se încheie în momentul când ambele ating obiectul prismatic semicentrat. Atunci planul (P_f) al fiecăruia va coincide (Figura 15a), deci:

$$H'_I = H'_{II} = \frac{b'}{2} \quad (2.1)$$

Centrarea obiectului prismatic (Figura 15b) se efectuează prin acțiunea a două perechi de bacuri I,II și III,IV, care se deplasează în translații perpendiculare, cu viteze egale în sensuri contrare două câte două.

În toate cazurile discutate, bacurile se apropie de obiect executând mișcări de translație. Acest lucru se realizează dacă dispozitivul de prehensiune conferă degetelor, de care sunt fixate bacurile, mișcări de translație.

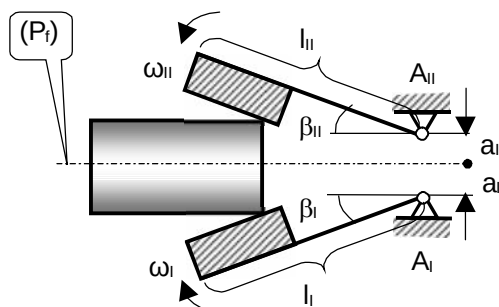


Figura 16. Centrarea obiectului prismatic prin contact cu bacuri rotitoare

Dacă bacurile se apropie de obiect prin mișcări de rotație, deci degetele au mișcări de rotație, prehensiunea obiectului prismatic în dispozitiv nu este stabilă (Figura 16.).

Condiția semicentrării obiectului prismatic este simetria lui în raport cu planul (P_f), ceea ce se exprimă prin:

$$\begin{cases} a_I = a_{II} \\ l_I = l_{II} \\ I = II \\ \mu_I = \mu_{II} \end{cases} \quad (2.2)$$

Centrarea obiectelor cilindrice pe suprafața lor exterioară se poate face cu ajutorul unor bacuri având suprafețe de contact plane. În cazul în care bacurile se apropie de obiect prin mișcări de translație pe aceeași direcție (Figura 17a), cu viteze egale și de semn contrar, respectând relația, se realizează semicentrarea obiectului după planul de simetrie (P_f), indiferent de diametru. Pentru obiectul cilindric semicentrat între bacuri paralele sunt îndeplinite relațiile:

$$H_I = H_{II} = \frac{D}{2} \quad (2.3)$$

Poziționarea obiectului între bacuri în modul arătat anterior nu este stabilă, el putând aluneca afară dintre acestea. Bacurile plane se pot apropia de obiect și după direcții care formează între ele unghiul $\alpha \neq \pi$ (Figura 17b), cu viteze egale ca modul:

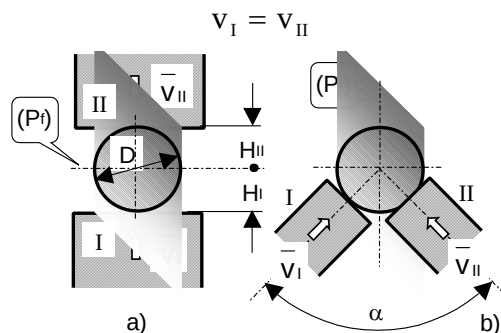


Figura 17. Semicentrarea unui obiect cilindric între 2 bacuri paralele (a), și înclinate cu unghiul $\alpha \neq \pi$ (b)

dar cu direcții orientate diferit, după perpendicularele pe cele două plane de contact. În acest caz semicentrarea se realizează după planul (P_f) care intersectează planul desenului după bisectoarea unghiului α .

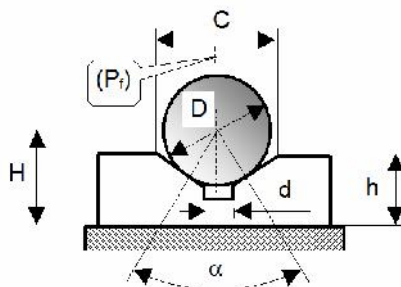


Figura 18. Obiect cilindric semi-centrat pe un bac prismatic

Un obiect cilindric poate fi semicentrat și prin contactul său cu un bac monobloc în care există prelucrate suprafețe plane, înclinate la unghiul α (Figura 18). Aceste suprafețe pot fi

considerate suprafețele alăturate ale unui alezaj prismatic, motiv pentru care se utilizează denumirea de "bac prismatic" sau mai simplu "prismă". Poziția axei obiectului cilindric în raport cu suprafața de bază a prisme depinde de diametrul cilindrului și de dimensiunile prisme, după relația:

$$H = h + \frac{D}{2 \cdot \sin \frac{\sim}{2}} - \frac{C}{2 \cdot \cos \frac{\sim}{2}} \quad (2.4)$$

Se observă că semicentrarea obiectului cilindric cu un singur bac prismatic se poate realiza stabil numai dacă diametrul obiectului satisface inegalitățile:

$$d < D < \frac{C}{\sin(\sim/2)} \quad (2.5)$$

Centrarea obiectului cilindric după o axă (δ_f) se poate realiza prin contactul suprafeței sale exterioare cu suprafețele plane a trei bacuri (Figura 18), care se apropie în mișcare de translație pe direcții concurente într-un punct de pe axa (δ_f), cu condiția ca între modulele vitezelor bacurilor să existe relația:

$$v_I \cdot \cos \frac{\sim}{2} = v_{II} \cdot \cos \frac{\sim}{2} = v_{III} \quad (2.6)$$

care pentru $\alpha = 2\pi/3$ devine:

$$v_I = v_{II} = v_{III} \quad (2.7)$$

De exemplu bacurile I și II realizează în aceste condiții semicentrarea după planul (P_f), iar bacurile I și III, după planul (P'_f), care intersectează planul desenului după bisectoarea unghiului format între direcțiile de translație ale bacurilor I și III.

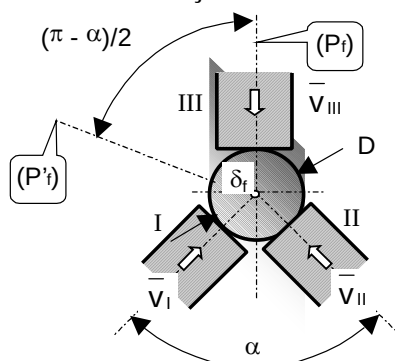


Figura 19. Centrarea obiectului cilindric cu 3 bacuri având suprafețe plane neparalele

Dreapta (δ_f) se găsește la intersecția acestor plane. Centrarea unui obiect cilindric se poate realiza și cu ajutorul unui bac cu suprafață plană și cu unul prismatic, care se apropie de obiect prin mișcări de translație pe aceeași direcție și în sensuri contrare (Figura 19), dacă între vitezele bacurilor există relația:

$$\frac{\vec{v}_I}{\cos^{-1} \frac{\sim}{2}} = -\vec{v}_{II} \quad (2.8)$$

Se realizează câte o semicentrare după fiecare din planele (P_f) și (P'_f) iar dreapta (δ_f) se găsește la intersecția celor două plane. În acest caz, H_I depinde atât de dimensiunile bacului prismatic cât și de diametrul obiectului conform relației, dar H_{II} depinde numai de diametrul obiectului:

$$H_{II} = \frac{D}{2} \quad (2.9)$$

Centrarea obiectului cilindric se poate obține și cu ajutorul a două bacuri prismatice amplasate simetric, dacă ele se apropie de obiect din sensuri opuse cu vitezele

$$\frac{\bar{v}_I}{\cos^{-1} \frac{\sim}{2}} = -\bar{v}_{II} \quad (2.10)$$

Distanțele H_I și H_{II} se determină în acest caz cu relația, respectând condiția.

Bacurile - cu suprafețe plane sau prismatice - se pot apropia de obiect și prin intermediul unor degete aflate în mișcare de rotație.

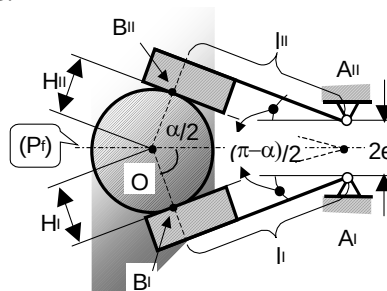


Figura 20. Centrarea obiectului cilindric prin contact cu bacuri plane și degete rotitoare

În Figura 20 se prezintă exemplul unor bacuri cu suprafețele de contact plane purtate pe degete rotitoare. Distanțele H_I și H_{II} se stabilesc în funcție de diametrul D al obiectului. Din desen rezultă:

$$\sim = 2 \arctg \frac{l}{H} \quad (2.11)$$

Ca urmare, unghiul de poziție α a degetelor depinde de distanța H , deci de diametrul D al obiectului de centrat.

În Figura 21 este ilustrată utilizarea pentru centrarea unui obiect cilindric cu două bacuri prismatice purtate de degete rotitoare. În acest caz distanțele H_I și H_{II} depind pe lângă diametrul obiectului și de dimensiunile prismelor, fiind calculabile. Direcția axei δ_f a obiectului centrat este perpendiculară pe planul desenului, trecând prin punctul de intersecție O al bisectoarelor unghiurilor celor două prisme. Pentru o pereche de prisme date, poziția lui O se îndepărtează de linia articulațiilor $A_I A_{II}$ dacă diametrul obiectului crește. Această comportare produce o eroare de centrare.

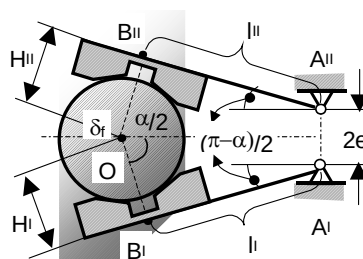


Figura 21. Centrarea obiectului cilindric cu bacuri prismatice și degete rotitoare

Eroarea de centrare a două obiecte cu diametrele $D_2 > D_1$ (Fig. 1.24) se datorează rotirii degetelor. Măsura acestei erori este dată de distanța între centrele O_1 și O_2 : $\Delta_{12} = O_1O_2 = O_2O_0 - O_1O_0$, sau în formă dezvoltată

$$\Delta_{12} = H_2 \cdot \cos \frac{\tilde{\alpha}_2}{2} + l \cdot \sin \frac{\tilde{\alpha}_2}{2} - H_1 \cdot \cos \frac{\tilde{\alpha}_1}{2} - l \cdot \sin \frac{\tilde{\alpha}_1}{2} \quad (2.12)$$

Unghiurile α_1 și α_2 se calculează cu relația de mai sus în funcție de H_1 și H_2 , prin intermediul cărora depind de diametrele D_1 , respectiv D_2 .

Cele patru suprafețe plane de contact cu obiectul mcelor două bacuri prismatice se pot considera ca făcând parte din suprafața interioară a unui alezaj prismatic, care "învăluie" suprafața cilindrică exterioară a obiectului. Principiul centrării unor obiecte prin contactul suprafețelor lor exterioare cu suprafețele interioare ale unor alezaje se utilizează și pentru obiecte având forme geometrice necilindrice.

Centrarea obiectelor tronconice pe suprafața lor exterioară se realizează cu ajutorul unor bacuri ale căror suprafețe plane de contact formează suprafețele interioare ale unui alezaj piramidal, tangente în momentul contactului la suprafața tronconică exterioară a obiectului.

Centrarea unui obiect cu ajutorul suprafeței interioare a unui alezaj tronconic se realizează cu ajutorul unui bac, având suprafața exterioară de asemenea tronconică și cu unghiul la vârf al conului diferit de unghiul la vârf al conului aferent suprafeței exterioare care mărginește obiectul.

Centrarea completă a unui obiect folosind suprafața interioară a unui alezaj tronconic se realizează cu două bacuri tronconice, construite conform condiției sus amintite și care se apropie de obiect în mișcare de translație după direcția axei alezajului și în sensuri contrare.

Centrarea obiectelor sferice se realizează cu ajutorul suprafețelor interioare ale unor alezaje tronconice prelucrate în bacuri și care sunt, în poziție de contact, tangente exterioare la suprafața sferei.

Menținerea în timp a situației obiectului manipulat în raport cu sistemul de referință atașat ultimului element al dispozitivului de ghidare se realizează prin eliminarea celor 6 grade de libertate pe care le are obiectul considerat în stare "liberă" față de același sistem de referință. În consecință, obiectul de manipulat trebuie să formeze în urma contactului cu bacurile o cuplă cinematică de clasa VI-a.

B. Închiderea

Închiderea acestei cuple cinematice se realizează prin formă sau forță.

Închiderea prin formă a cuplei cinematice bacuri-obiect se realizează prin "învăluire" (wrapping) a obiectului de către bacuri.

Imobilizarea obiectului în raport cu dispozitivul de prehensiune (cu totalitatea bacurilor acesteia) se realizează creând între obiect și bacuri un număr de puncte de contact cel puțin egal cu 12 (câte două puncte pentru fiecare grad de libertate).

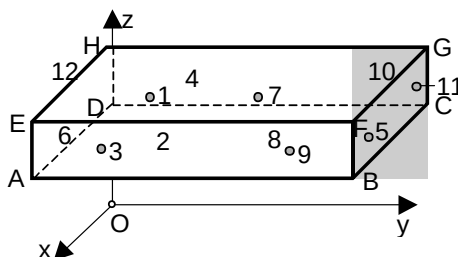


Figura 22. Amplasarea punctelor de contact pentru imobilizarea unui obiect paralelipedic

Această idee este exemplificată în Figura 22, în care se prezintă modul de imobilizare al unui obiect paralelipedic. Punctele 1 (de pe fața EFGH) și 2 (de pe fața ABCD), aparținând bacurilor, împiedică translația obiectului în cele două sensuri ale axei O_z ; 3 (de pe fața ABFE) și 4 (de pe fața DCGH) - împiedică translațiile după O_x ; 5 (de pe fața BCGH) și 6 (de pe fața ADHE) - împiedică translațiile după axa O_y ; punctele 1 cu 7 (de pe fața EFGH) și 2 cu 8 (de pe fața ABCD) împreună - împiedică rotația în ambele sensuri în jurul axei O_x ; punctele 3 cu 9 (de pe fața ABFE) și 4 cu 10 (de pe fața BCGF) - împiedică rotația în jurul axei O_y , iar punctele 5 cu 11 (de pe fața BCGF) și 6 cu 12 (de pe fața ADHE) - împiedică rotația în jurul axei O_z . Un număr mai mare de puncte de contact dintre obiect și bacuri mărește stabilitatea prehensiunii. Se vede faptul că "norul de puncte" 1 ÷ 12 "învăluie" obiectul.

Două puncte de contact pe aceeași față înlocuiesc o linie de contact cu bacul, trei puncte de contact pe o față înlocuiesc o suprafață de contact cu bacul.

Închiderea prin forță a cuplei cinematice bacuri - obiect are loc prin strângere. În timpul manipulării de către robot a unui obiect, asupra acestuia acționează forțe masice (gravitaționale și de inerție) și reacțiuni de contact cu alte corpuri (în unele cazuri și forțe tehnologice). Torsorul rezultat al acestor forțe tinde să smulgă obiectul manipulat dintre bacuri, "deschizând" cupla cinematică bacuri-obiect.

În vederea împiedicării smulgerii, dispozitivul de prehensiune impune degetelor ca bacurile fixate pe ele să apese asupra obiectului. În urma acestei apăsări, obiectul, dar și bacurile, degetele și celelalte elemente ale dispozitivului de prehensiune suferă niște deformații elastice de mică amplitudine, ceea ce generează reacțiuni între obiect și bacuri. Reacțiunea care lucrează de la bac spre obiect constituie forța de strângere. Ea se menține în tot timpul prehensiunii datorită împiedicării dispariției deformațiilor elastice fie prin menținerea forței generalizate de acționare a dispozitivului de prehensiune, fie prin intercalarea în structura acestuia a unui element de autofrânare.

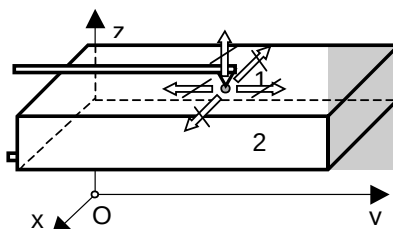


Figura 23. Corelația dintre închiderea prin formă și cea prin forță a cuplei cinematice bacuri-obiect

Se consideră obiectul paralelipedic din Figura 23 strâns cu ajutorul a două degete cu bacuri punctiforme. Contactul în punctele 1 și 2 împiedică translația obiectului după cele două sensuri ale direcției O_z , iar forțele de frecare dintre bac și obiect din punctul 1 împiedică mișcările

de translație ale obiectului după direcțiile Ox și Oy . Cu alte cuvinte, punctul 1 joacă rolul pe care îl au 5 puncte de contact la cazul prezentat anterior în Figura 22.

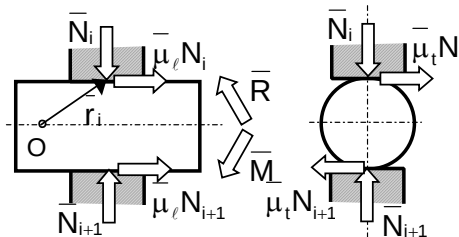


Figura 24. Forțele de strângere care acționează asupra obiectului de manipulat

Deformarea elastică a bacului și a obiectului cauzată de forța de strângere creează noi puncte de contact între acestea, care împiedică rotația obiectului în jurul axelor paralele cu Ox , Oy și Oz . Forța de strângere dezvoltată de bacul i din Figura 24 are o componentă normală $\bar{N}_i$ și două componente tangențiale $\bar{\mu}_l N_i$ și $\bar{\mu}_t N_i$, cu caracter de forțe de frecare ($\bar{\mu}_l$ și $\bar{\mu}_t$ sunt vectorii coeficienților de frecare).

Pentru ca torsiul forțelor de strângere să anuleze torsiul forțelor care tind să smulgă obiectul dintre bacuri, pentru „ n ” bacuri, trebuie să fie îndeplinite condițiile:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (\bar{N}_i + \bar{\mu}_l N_i + \bar{\mu}_t N_i) \geq \bar{R} \\ \sum_{i=1}^n \bar{r}_i \times (\bar{N}_i + \bar{\mu}_l N_i + \bar{\mu}_t N_i) \geq \bar{M} \end{cases} \quad (2.13)$$

Notând forța generalizată de acționare a elementului conducător din dispozitivul de prehensiune cu $\bar{F}_1$ și aplicând teorema deplasării virtuale se poate scrie:

$$\bar{F}_1 \cdot \delta \bar{s}_1 = \sum_{i=1}^n \bar{N}_i \cdot \delta \bar{s}_i \quad (2.14)$$

unde δs_1 este deplasarea virtuală a punctului de aplicație a forței de acționare iar δs_i este deplasarea virtuală a punctului de aplicație a forței de destrângere la bacul „ i ”. Înlocuind deplasările virtuale cu cele de deformare elastică reale $\delta s_1 = ds_1$, respectiv, $\delta s_i = ds_i$ și notând cu F_{1i} cota parte din forța de acționare care cauzează forța de strângere N_i , rezultă:

$$\frac{F_{1i}}{N_i} = \frac{ds_i}{ds_1} = \frac{ds_i/dt}{ds_1/dt} = \frac{v_i}{v_1} = f_i(s_1) \quad (2.15)$$

unde v_i și v_1 sunt vitezele punctelor de aplicație ale forțelor $\bar{N}_i$ și $\bar{F}_1$ iar $f_i(s_1)$ este funcția de transmitere de ordinul unu al dispozitivului de prehensiune, având ca variabilă independentă deplasarea generalizată a elementului conducător, în cazul de față s_1 . Inversa funcției de transmitere este caracteristica mecanică $C_m(s_1)$ a dispozitivului de prehensiune, care exprimă variația raportului dintre forța de strângere a unui bac și cota parte din forța de acționare care o cauzează, în funcție de deplasarea elementului conducător:

$$C_m(s_1) = \frac{N_i}{F_{1i}} = \frac{1}{f_i(s_1)} \quad (2.16)$$

Cum deplasarea elementului conducător până în momentul strângerii depinde de dimensiunea obiectului prehsat (spre exemplu de distanța dintre suprafețele de contact a două bacuri opuse),

caracteristica mecanică a dispozitivului de prehensiune este o funcție în care variabila independentă reprezintă o dimensiune D a obiectului (Figura 25).

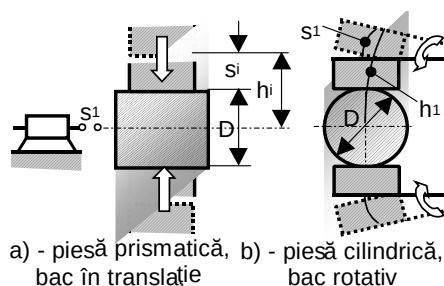


Figura 25. Corelația dintre deplasarea bacului și dimensiunea D a obiectului

Funcția de transmitere de ordinul zero al unui mecanism este:

$$\frac{s_i}{s_1} = f_0(s_1) \quad (2.17)$$

Pentru piese prismatice și bacuri în mișcare de rotație (Figura 25a):

$$s_i = h_i - D/2 \quad (2.18)$$

unde h_i este cursa maximă a bacului "i" iar D este o dimensiune a obiectului. Cu acestea:

$$s_1 = \frac{h_i - D/2}{f_0(h_i - D/2)} \quad (2.19)$$

Pentru piese cilindrice și bacuri în mișcare de rotație (Figura 25b) s_1 și h_1 reprezintă niște arce de cerc. În acest caz s_1 rezultă dintr-o relație asemănătoare cu

$$\overline{F}_1 \cdot \Phi \overline{s}_1 = \sum_{i=1}^n \overline{N}_i \cdot \Phi \overline{s}_i \quad (2.20)$$

dar numărătorul și numitorul vor avea forme mai complexe.

Pe baza celor arătate, caracteristica mecanică a dispozitivului de prehensiune este în general de forma:

$$C_m(D) = \frac{N_i}{F_{li}} = \frac{1}{f_i[f(D)]} \quad (2.21)$$

Dacă torsorul forțelor care tind să smulgă obiectul manipulat este influențat mai ales de forțele masice (gravitaționale și de inerție), forțele de strângere trebuie să crească cu masa obiectului, deci cu D^2 . Expresia caracteristicii mecanice a dispozitivului de prehensiune trebuie să fie atunci de forma:

$$C_m(D) = a + b \cdot D^2 \quad (2.22)$$

unde a și b sunt constante (Figura 26 - curba a).

Dacă forțele masice au o influență neglijabilă asupra torsorului forțelor de smulgere ale obiectului, forța de strângere poate fi independentă de dimensiunile obiectului și expresia caracteristicii mecanice a dispozitivului de prehensiune va fi:

$$C_m(D) = a \quad (2.23)$$

unde a este o constantă (Figura 26 - curba b).

Dacă dispozitivul de prehensiune este destinat manipulării unor obiecte de dimensiuni neschimbate, dispozitivul de prehensiune trebuie să asigure apropierea bacului de obiect cu viteză

mare și apoi dezvoltarea unei forțe de strângere rapid crescătoare imediat după ce bacul a atins obiectul (Figura 26 - curba c).

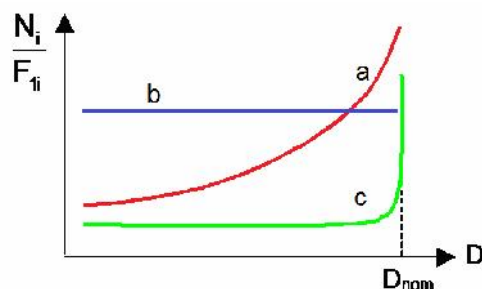


Figura 26. Diferite caracteristici mecanice ale unor mecanisme de prehensiune

Unele dispozitive de prehensiune realizează "închiderea mixtă" a cuplei cinematice bacuri - obiect manipulat; ele au mai puține puncte teoretice de contact decât 6, lipsa acestora fiind suplinită prin forțe de strângere de intensitate mai mică decât în cazul închiderii prin "forțe pure".

2.2.2. Clasificarea dispozitivelor de prehensiune

O schemă generală de clasificare a prehensorilor este cea prezentată în Figura 27.

Clasificarea acestor sisteme se poate realiza în funcție de mai multe criterii, după cum urmează:

- a. În funcție de metoda de prehensiune (Tabelul 1), pot exista sisteme cu contact (la care două sau mai multe forțe sunt aplicate direct obiectului), intruzive (prehensiunea este realizată prin străpungerea suprafeței corpului), astringente (o forță de legătură este aplicată într-o singură direcție) și contigue (o metodă de prehensare fără contact, la care este necesară generarea unei forțe de atragere pe o singură direcție) [71];

Tabel 1. Clasificarea prehensorilor funcție de metodele de prehensiune

Metode de prehensiune	Tipul prehensorului	Obiect de prehensat
Cu contact	Cu bacuri, tentacular	Obiecte rigide
Intruziv	Intruziv	Obiecte flexibile: textile, carbon, fibră de sticlă
Astringent	Vacuumatic	Obiecte rigide, neporoase
	Magnetoadeziv	Materiale feroase
	Electroadeziv	Table subțiri
Contigue	Termic	Obiecte flexibile: textile, carbon, fibră de sticlă
	Chimic	Fibră de carbon impregnată cu adeziv
	Cu tensiune superficială	Obiecte mici și ușoare

- b. în funcție de tipul mișcării executate de bacurile de prindere: cu mișcare de rotație (prehensoare unghiulare) și cu mișcare liniară (prehensoare paralele) (Figura 27);

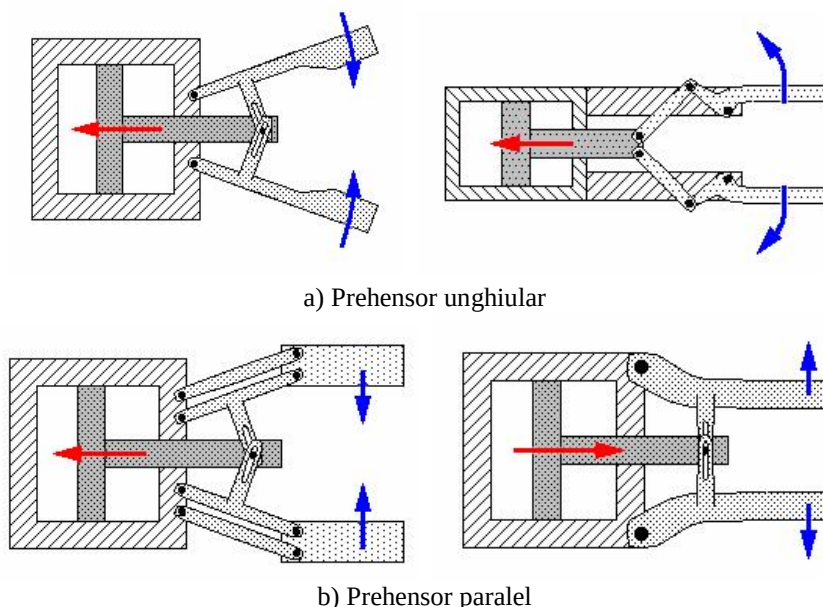


Figura 27. Clasificarea prehensivilor după tipul mișcării

- c. după numărul zonelor de prindere a obiectului, sistemele de prehensiune pot fi cu două (cel mai des), cu trei sau cu mai multe degete (bacuri);
- d. după materialul din care e executat elementul de prehensiune: cu bacuri rigide, cu bacuri adaptive la forma obiectului prehensat, cu tentacule realizate din elastomeri;
- e. după tipul energiei folosite pentru acționarea actuatorului, sistemele de prehensiune pot fi pneumatice, hidraulice, cu vacuum, servo-electrice, magnetice, cu aliaje cu memoria formei etc.

2.3. Generalități privind acționarea dispozitivelor de prehensiune

Actuatorii (care ar trebui să se cheme acționatori, deoarece termenul actuator a fost preluat în mod „automat” din limba engleză fără să existe o acțiune corespunzătoare în limba română - a actua - așa cum există în limba franceză *actionneur* de la *actionner* = a acționa) sunt constituiți din materiale inteligente capabile să efectueze o acțiune [28].

Ei au capacitatea de ași modifica:

- forma (generând lucru mecanic);
- rigiditatea;
- poziția;
- frecvența vibrațiilor interne;
- capacitatea de amortizare;
- frecarea internă;
- vâscozitatea,

ca reacție la variațiile de temperatură, câmp electric sau magnetic. Cele mai răspândite materiale pentru actuatori (numite și materiale reactive sau adaptive) sunt: materialele cu memoria formei,

materialele piezoelectrice, materialele electrostrictive și magnetostrictive precum și materialele electoreologice sau magnetoreologice.

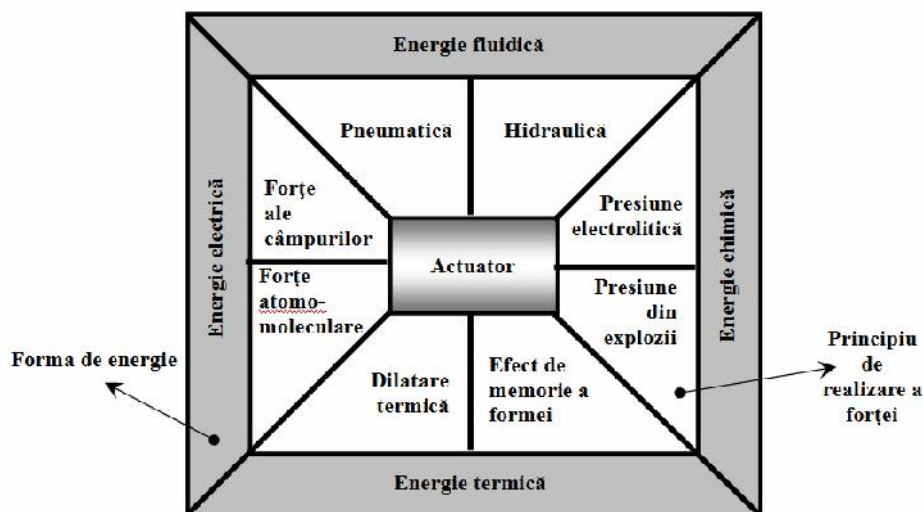


Figura 28. Forme de energie și efecte pentru realizarea unor acțiuni mecanice
Sursa: [21]

Pentru dezvoltarea forțelor și momentelor și realizarea mișcărilor în sistemele mecatronice se utilizează sisteme de acționare de cele mai diferite tipuri și forme de energie. Pentru cuprinderea tuturor acestor dispozitive tehnice într-o singură noțiune, se utilizează, în literatura străină, termenul de actor (de la verbul englez „to act” = a acționa), care include toate elementele de ieșire, destinate producerii de forțe și mișcări. În Figura 28 sunt sintetizate principalele forme de energie și de efecte pentru realizarea unor acțiuni mecanice, iar Tabelul 1 cuprinde o detaliere a diferiților actori, care utilizează o anumită formă de energie.

Actorul include două componente de bază, una care furnizează energia necesară, în baza semnalelor primite de la sistemul numeric de comandă, cea de-a doua care transformă energia primită în energie mecanică, utilizată pentru dezvoltarea de forțe / momente și / sau efectuarea mișcărilor. În cazul utilizării energiei electrice, prima componentă poate fi implementată, de la caz la caz, cu un simplu releu sau cu un bloc de tranzistoare de putere, cu logica și circuitele de reacție adecvate, după cum, în cazul utilizării energiei hidraulice sau pneumatice, distribuirea acestora se poate face cu ventile simple sau cu servo-ventile.

În măsura în care cele două componente sunt distincte, cea de-a doua este încadrată, în cele mai multe cazuri în noțiunea de motor.

În acest caz, vorbim despre:

- motoare electrice, rotative (motorul pas cu pas, motorul de curent continuu, motorul sincron, motorul asincron) sau liniare (motorul pas cu pas liniar, motorul asincron liniar);
- motoare fluidice (hidraulice sau pneumatice) liniare (cilindrii hidraulici / pneumatici) sau rotative (cu palete, cu pistoane axiale, cu pistoane radiale).

Este, în special, cazul sistemelor de acționare clasice. Sistemele de acționare noi, încadrate și în noțiunea de acționări neconvenționale, își bazează funcționarea pe fenomene interne din rețeaua moleculară sau cristalină a unor materiale speciale (Tabelul 2), în cazul cărora noțiunea de motor nu mai poate fi utilizată.

Tabel 2. Principii de transformare a energiei și actuatorii semnificativi

Energie electrică	Câmpuri electrice și magnetice externe	Electromotor
		Electromagnet
	Forțe moleculare Interne	Actori feroelectrici
		Actori magnetostrictivi
		Actori piezoelectrici
Energie fluidică	Forțe de presiune realizate pneumatic	Sisteme cu presiuni mai mari decât presiunea atmosferică
		Sisteme cu presiuni mai mici decât presiunea atmosferică
	Forțe de presiune realizate hidraulic	Motoare hidraulice
Energie termică	Dilatare termică	Bimetal termic
		Actor bazat pe dilatarea termică
	Efectul de memorie a formei	Aliaje cu memorie uni-sens
		Aliaje cu memorie dublu-sens
Energie chimică	Presiune din electroliză	Acționări electrochimice
	Presiune din explozie	Acționări pirotehnice

Ca o concluzie, cele patru tipuri de acționări utilizate în prezent în tehnică sunt:

- acționarea hidraulică;
- acționarea pneumatică;
- acționarea electrică (motorul electric de curent continuu; servomotorul de curent continuu; motoare electrice pas cu pas; motoare electrice pas cu pas rotative și liniare; motorul asincron trifazat. motoare electrice liniare)
- acționări speciale (actuatori chimici; actuatori pe baza de aliaje cu memorie a formei; actuatori piezoelectrici; actuatori magnetostrictivi; actuatori electrostatici; actuatori optici etc.)

Dintre aceste moduri de acționare s-au selecționat câteva tipuri reprezentative, (punând accentul pe acționările electrice și speciale, acestea fiind cele mai potrivite pentru obiectivul general urmărit în prezent de platformele tehnologice, atât europene cât și cele naționale, respectiv miniaturizarea actuatorilor, care sunt prezentate în paginile următoare.

2.3.1. Actuatori clasici

2.3.1.1. Motoare pas-cu-pas

Motorul pas cu pas (MPP) [60] este un convertor electromecanic care realizează transformarea unui tren de impulsuri digitale într-o mișcare proporțională a axului său. Mișcarea rotorului MPP constă din deplasări unghiulare discrete, succesive, de mărimi egale și care reprezintă pașii motorului. În cazul unei funcționări corecte, numărul pașilor efectuați trebuie să corespundă cu numărul impulsurilor de comandă aplicate fazelor motorului.

Deplasarea unghiulară totală, constituită dintr-un număr de pași egal cu numărul de impulsuri de comandă aplicat pe fazele motorului, determină poziția finală a rotorului. Această poziție se păstrează, adică este memorată, până la aplicarea unui nou impuls de comandă. Proprietatea de univocitate a conversiei impulsuri - deplasare, asociată cu aceea de memorare a

poziției, fac din MPP un excelent element de execuție, integrat în sistemele de reglare a poziției în circuit deschis. MPP mai prezintă proprietatea de a putea intra în sincronism față de impulsurile de comandă chiar din stare de repaus, funcționând fără alunecare, frânarea efectuându-se, de asemenea, fără ieșirea din sincronism. Datorită acestui fapt se asigură porniri, opriri și reîntoarceri bruște fără pierderi de pași în tot domeniul de lucru [66].

Viteza unui MPP poate fi reglată în limite largi prin modificarea frecvenței impulsurilor de intrare. Astfel, dacă pasul unghiular al motorului este $1,8^\circ$ numărul de impulsuri necesare efectuării unei rotații complete este 200, iar pentru un semnal de intrare cu frecvența de 400 impulsuri pe secundă turația motorului este de 120 rotații pe minut. MPP pot lucra până la frecvențe de 1000 - 20000 pași / secundă, având pași unghiulari cuprinși între 180° și $0,3^\circ$. Aplicațiile acestora sunt limitate la situațiile în care nu se cer puteri mari (puteri uzuale cuprinse între domeniile microwaților și kilowaților). MPP sunt utilizate în aplicații de mică putere, caracterizate de mișcări rapide, precise, repetabile: plotere x-y, unități de disc flexibil, deplasarea capului de imprimare la imprimante serie, acționarea mecanismelor de orientare și prehensiune la roboți, deplasarea axială a elementelor sistemelor optice, mese de poziționare 2D pentru mașinile de găurit etc.

Utilizarea MPP conferă următoarele avantaje:

- asigură univocitatea conversiei număr de impulsuri - deplasare și pot fi utilizate în circuit deschis;
- gamă largă a frecvențelor de comandă;
- precizie de poziționare și rezoluție mari;
- permit porniri, opriri, întoarceri fără pierderi de pași;
- memorează poziția;
- sunt compatibile cu comanda numerică.

Principalele dezavantaje ale utilizării MPP sunt:

- unghi de pas, deci increment de rotație, de valoare fixă pentru un motor dat;
- viteză de rotație relativ scăzută;
- putere dezvoltată la arbore de valoare redusă;
- randament energetic scăzut;

Funcționarea unui MPP nu poate fi privită decât în contextul întregului ansamblu motor-sarcină (sistem mecanic) și, în acest sens, în cadrul capitolului 3, au fost rezolvate toate aspectele legate de cinematica și dinamica acționării: reducerea maselor/momentelor de inerție și a forțelor/momentelor la axul MPP, stabilirea profilului de viteză și a vitezelor/accelerațiilor necesare deplasării sarcinii într-un timp impus, în funcție de tipul dispozitivului de acționare utilizat.

Tipul sarcinii și al dispozitivului de acționare sunt esențiale pentru alegerea MPP, prin:

- impunerea unei anumite rezoluții a sistemului mecanic;
- reducerea maselor / momentelor de inerție la axul mpp;
- reducerea forțelor / momentelor la axul motorului;
- impunerea unui profil de viteză pentru realizarea mișcărilor.

Încadrarea raportului moment de inerție reflectat / moment de inerție al MPP în limite adecvate.

Printre cele mai importante mărimi caracteristice, mecanice și electrice, (vezi pentru unele Figura 29), ale MPP se definesc:

- unghiul de pas (θ_p) este unghiul cu care se deplasează rotorul la aplicarea unui impuls de comandă;
- frecvența maximă de start-stop în gol este frecvența maximă a impulsurilor de comandă, la care motorul poate porni, opri sau reversa fără pierderi de pași (f_{Aom} - Figura 29);
- frecvența limită de pornire reprezintă frecvența maximă a impulsurilor de comandă, cu care MPP poate porni, fără pierderi de pași, pentru un cuplu rezistent și un moment de inerție date (f_{Am} - Figura 29);
- cuplul limită de pornire reprezintă cuplul rezistent maxim la arbore, cu care MPP poate porni, la o frecvență și un moment de inerție date, fără pierderi de pași (M_L^* - Figura 29);
- caracteristica limită de pornire definește domeniul cuplu-frecvență de comandă limită, în care MPP poate porni fără pierderi de pași (curba Start - Stop pentru pornire în gol - $J_L = 0$, respectiv curba cu linie întreruptă pentru pornire în sarcină - $J_L \neq 0$);
- frecvența maximă de mers în gol este frecvența maximă a impulsurilor de comandă pe care o poate urmări motorul, fără pierderea sincronismului (f_{Bom} - Figura 29);
- frecvența limită de mers reprezintă frecvența maximă cu care poate funcționa un MPP, pentru un cuplu rezistent și un moment de inerție date;
- cuplul limită de mers reprezintă cuplul rezistent maxim, cu care poate fi încărcat un MPP pentru un moment de inerție dat și o frecvență de comandă cunoscută.

Caracteristica de mers definește domeniul cuplu limită de mers-frecvență limită de mers (curba Moment limită M_{Bm} - Figura 29), în care MPP poate funcționa în sincronism, fără pierderi de pași.

Viteza unghiulară (ω) poate fi calculată ca produs dintre unghiul de pas și frecvența de comandă:

$$\omega \text{ [rad/s]} = 2\pi \cdot 3 = 2\pi \cdot \frac{f_c}{N} = \omega_p \text{ [rad]} \cdot f_c \text{ [Hz]} \quad (2.24)$$

Puterea la arbore este puterea utilă la arborele motorului, corespunzătoare punctului de funcționare de pe caracteristica de mers, punct caracterizat de cuplul limită de mers și de frecvența maximă de mers.

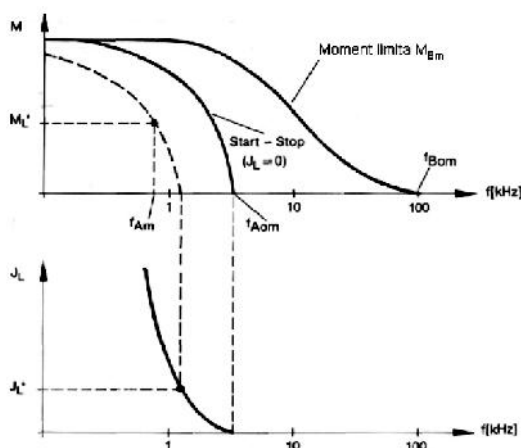


Figura 29. Curbe și mărimi caracteristice ale MPP

Cuplul de menținere este egal cu cuplul rezistent maxim, care poate fi aplicat la arborele motorului cu fazele nealimentate, fără ca să provoace rotirea continuă a rotorului.

2.3.1.2. Servomotoare de curent continuu

Servomotoarele de curent continuu sunt utilizate în foarte multe aplicații din domeniul mecanicii fine și mecatronicii (roboți industriali și de servicii, vehicule cu ghidare automată, periferice de calculator, automate de control și servire, automate bancare etc.), datorită unor caracteristici remarcabile:

- domeniu amplu al puterilor / momentelor dezvoltate;
- moment de inerție redus al părților mobile și, în consecință, un raport mare putere/moment de inerție;
- posibilitatea reglării în limite foarte largi a turației;
- greutate și volum mici;
- moment de impuls foarte mare, care oferă o protecție la supra-sarcini de scurtă durată;
- facilități favorabile de montare etc.

Principiul de funcționare a unui motor de curent continuu poate fi înțeles cu ajutorul Figurii 29. Asupra unui conductor parcurs de un curent electric, I , și aflat într-un câmp magnetic de inducție, B , se exercită o forță, F , al cărei sens poate fi determinat cu "regula mâinii drepte" (vectorul B intră în palmă, degetele sunt orientate de-a lungul lui I , iar degetul mare indică sensul forței). Mărimea acestei forțe, pentru cazul în care B și I sunt perpendiculare.

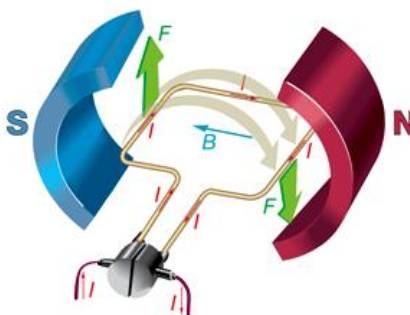


Figura 30. Principiul de funcționare a unui motor de curent continuu

Se consideră, în continuare, un rotor de rază, r , pe care sunt dispuse mai multe cadre dreptunghiulare. Se constată că asupra jumătății din dreapta a conductorului, a cărui normală la suprafață este perpendiculară, la un moment dat, pe inducția B , se exercită o forță, F , îndreptată în jos. Apare un cuplu de forțe, care tinde să rotească rotorul în sensul acelor de ceasornic. Pentru ca momentul mecanic, care acționează asupra rotorului, să-și mențină sensul, este necesar un comutator, care să determine schimbarea ciclică a sensului curentului prin conductoarele motorului, pe măsură ce acestea se deplasează în câmpul magnetic.

2.3.1.3. Actuatori piezoelectrics

Câteva aspecte legate de actuarii piezoelectrics pot constitui, în multe cazuri, cea mai bună soluție de acționare, datorită unor performanțe remarcabile, cum ar fi:

- rezoluție teoretic nelimitată, care practic coboară sub limita unui nanometru; cele mai mici modificări ale tensiunii de alimentare sunt transformate în mișcări liniare, fără salturi (praguri);

- dezvoltarea unor forțe de acționare foarte mari. Pot poziționa sarcini mai mari de 10.000 N în limita a circa 100 μm , cu precizii de ordinul micronilor;
- timpi de răspuns sub o milisecundă - (alungirea unui actuator piezoelectric este limitată numai de viteza de propagare a sunetului în materialele ceramice. Pot fi obținute accelerații de câteva mii de ori mai mari decât accelerația gravitațională);
- absența elementelor în mișcare, și, implicit, a frecărilor și a jocurilor. Alungirea unui actuator piezoelectric se bazează numai pe deformarea solidului și nu prezintă semne de îmbătrânire. Testele de durabilitate au dovedit că nu există modificări în funcționare după 500 de milioane de cicluri de alungire;
- consum de putere foarte mic. Efectul piezo [52] convertește direct energia electrică în mișcare liniară. Elementul de acționare absoarbe energie numai în timpul alungirii, când consumă un curent electric pentru încărcare;
- absența câmpurilor magnetice etc;

Aceste avantaje au impus utilizarea actuatorilor piezoelectrice într-un mare număr de domenii:

- mecanică fină și inginerie mecanică - scule de ajustare și extruziune; corecția uzurii sculelor în controlul activ; controlul duzelor de injecție; micropompe; ciocane piezo; sisteme de microgravare; sisteme pentru absorbția activă a vibrațiilor; micro- și nanoroboți;
- optică și sisteme de măsurare - poziționarea și scanarea rapidă a oglinzilor; holografie; interferometrie; baleiere cu fascicule laser; poziționarea fibrelor optice; stabilizarea imaginii; autofocalizare; optică activă și adaptivă;
- medicină - micromanipulare și microchirurgie; penetrarea celulelor; dispozitive pentru microdozare; stimulare fiziologică; generarea de șocuri;
- microelectronică - poziționarea măștilor; microlitografie; sisteme de investigare și control [29].

Un actuator piezoelectric este un element de poziționare, controlat electric, care funcționează pe baza efectului piezoelectric. Efectul direct, utilizat, de exemplu, în cazul senzorilor de forță piezoelectrice, presupune generarea unor sarcini electrice ca efect al solicitărilor mecanice. În cazul actuatorilor se utilizează efectul invers, respectiv un câmp electric, paralel cu direcția de polarizare, determină o alungire a materialului cristalin, după aceeași direcție. Câmpul electric generează un cuplu asupra dipolilor electrice din structura materialului, care produce o aliniere a acestora de-a lungul câmpului și, în consecință, o schimbare a lungimii regiunilor monocristaline.

Întrucât materialele monocristaline naturale, cum ar fi cuarțul, turmalina, sarea Rochelle etc. prezintă efecte piezoelectrice de mică amploare, au fost dezvoltate materiale ceramice policristaline, cum ar fi plumb - zirconat - titanat (PZT), cu proprietăți piezoelectrice superioare. Ceramicele PZT se produc într-o gamă largă de variante și reprezintă materialele de bază pentru actuatorii piezoelectrice.

Informațiile prezentate despre actuatorii piezoelectrice sunt sintetizate din documentația firmei Physik Instrumente [131], una dintre cele mai importante în domeniu. Ea produce PZT-uri de joasă și înaltă tensiune. În timp ce elementele de înaltă tensiune necesită tensiuni de lucru de până la 1000 V, pentru a obține o alungire maximă, cele de joasă tensiune pot realiza acest lucru cu tensiuni de până la 100 V. Se va adopta, în continuare, prescurtarea PZT și pentru denumirea unui

piezo-translator, respectiv un actuator piezoelectric, care se alungește când este supus unui câmp electric.

Alungirea maximă a unui PZT depinde de materialul ceramic utilizat, de lungimea lui, L [m], de intensitatea câmpului electric, E [V/m] și de forța, F [N], care acționează asupra lui. Modificarea lungimii, ΔL [m], poate fi exprimată cu ajutorul relației:

$$\Delta L = E \cdot d_{ij} \cdot L_0 + \frac{F}{c_T} = \Delta L_0 + \frac{F}{c_T} \quad 2.25$$

unde d_{ij} [m/V] reprezintă o constantă a materialului, dependentă de direcția după care se realizează alungirea, iar c_T [N/m] este constanta elastică a materialului.

Alungirea maximă este limitată de intensitatea câmpului electric la care poate fi supus actuatorul, fără să fie distrus de șocurile de tensiune. Limitele sunt situate între $1 \div 2$ KV/mm. Cu materialele ceramice utilizate se pot obține modificări relative ale lungimii de $0,10 \div 0,13\%$, astfel încât, de exemplu, pentru un PZT în stivă, cu lungimea de 100 mm, alungirea maximă va fi de 130 μm .

2.3.2. Actuatori cu elemente din aliaje cu memoria formei

Actuatori liniari, ca cel prezentat în Figura 31, sunt deja disponibili achiziționării la scară comercială. Mărimea acestora este aproximativă cu cea a unei monede. Aceștia sunt însă în studiu pentru îmbunătățirea proprietăților lor, a reducerii continue a dimensiunilor, urmărindu-se realizarea lor la scară micro.

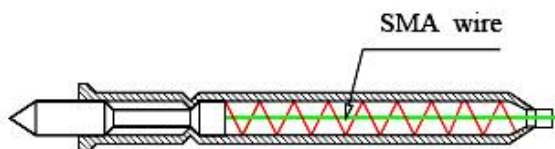


Figura 31. Actuator liniar (from Moorleghem 1993)
Sursa: [105]

Dintre modelele de actuatori propuse trebuie de asemenea menționat modelul propus de Bergamasco et al. [23], în care articulația se rotește înainte și înapoi prin încălzirea alternativă a arcurilor din Nitinol (Figura 32). Acest concept a fost preluat pentru proiectarea multor altor tipuri de actuatori din AMF. Principalul avantaj al acestui model îl prezintă utilizarea unui mediu lichid de răcire, fapt ce reduce timpul de răspuns al elementului activ.

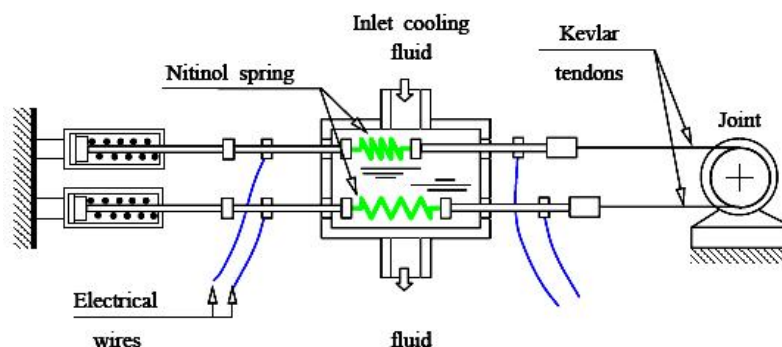


Figura 32. Actuator SMA (Bergamasco et al. 1989)
Sursa: [105]

Alte tehnologii care utilizează răcirea rapidă a AMF includ semiconductori, incinte de imersiune calde, sau perechi antagoniste de fire. Figura 33 prezintă o secțiune printr-un actuator liniar, care constă din 12 fire din NiTi împletite elicoidal în jurul unei structuri alcătuite din 2 discuri. Încălzirea acestora produc contractarea elementelor din AMF, obținând apropierea discurilor suport [39] [105].

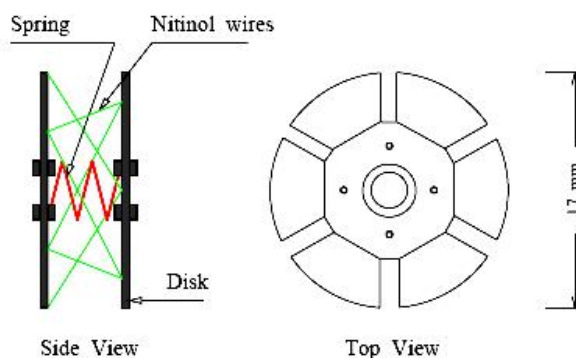


Figura 33. Modelul Grant and Hayward (1995)
Sursa: [105]

Un endoscop activ ce utilizează de asemenea arcuri din Nitinol a fost proiectat și testat de către (Hirose et al. 1989) [105]. Controlul poziției fiecărei secțiuni se bazează pe răspunsul la schimbarea rezistenței cauzate de transformarea de fază din timpul funcționării (Figura 34).

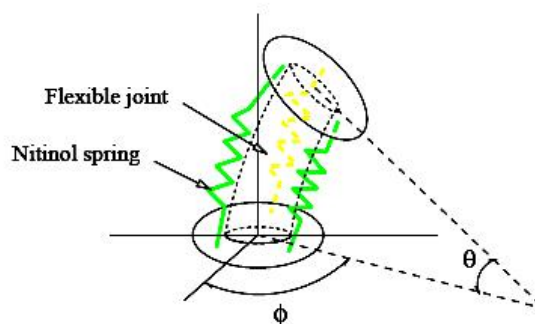


Figura 34. Modelul endoscopului Hirose (1995)
Sursa: [105]

În timp ce pentru obținerea de deplasări ample ale actuatorilor s-au utilizat fire elicoidale (arcuri), pentru obținerea cuplurilor de torsiune sau a forțelor de ieșire ridicate s-a optat pentru utilizarea firelor drepte.

2.4. Considerații privitoare la aliajele cu memoria formei

Referiri generale și sinteze documentare asupra acestor proprietăți au fost deja publicate atât pe plan internațional și câteva referiri pe plan național. În ceea ce privește cercetările specifice, grupate pe familii de aliaje respectiv pe proprietăți și pe aplicații cele mai cuprinzătoare rezultate sunt evidențiate în conferințele ICOMAT (International Conference on Martensitic Transformation) [129] care au loc periodic. Tot în volumele acestor conferințe sunt publicate și cele mai noi realizări în utilizarea practică a aliajelor cu memorie a formei. Printre utilizări se remarcă folosirea aliajelor

cu memorie în scop pur demonstrativ sau la realizarea de senzori, elemente super-elastice (în special pe domeniul biomedical), actuatori, regulatori, elemente de amortizare.

2.4.1. Aspecte privind funcționarea aliajelor cu memoria formei

Aliajele cu memorie a formei sunt binecunoscute de mai multe decenii și se caracterizează prin capacitatea de a recupera o formă avută înainte a unei deformări plastice printr-o simplă încălzire. În afară de acest efect numit și efectul simplu de memorie a formei se mai pot observa și efectul dublu de memorie (obținut în urma unor tratamente termo-mecanice complexe, numite și de educare), efectul “all round” (o particularitate a efectului dublu de memorie), super-elasticitatea (frecvent utilizată în aplicații medicale pentru că asociază deformații mari unor modificări mici ale tensiunii), capacitatea de amortizare (mai ridicată în anumite intervale de temperatură asociate cu transformarea de fază specifică pentru familia de aliaje), bio-compatibilitatea (predominant la familia NiTi), feromagnetismul (observat la aliaje tip Heusler și la unele aliaje feroase permite acționarea simultană prin stimulări termice sau magnetice) și caracterul inoxidabil (unele aliaje feroase) [28].

În afara de aliaje, efectul de memorie a mai fost pus în evidență și în materiale polimerice sau ceramice, însă în general caracteristicile nu sunt atât de spectaculoase și utilizarea este limitată la aplicații specifice (exemplu manșoanele Raychem). În acest sens se arată că tensiunea de recuperare a formei în materiale polimerice este de aproape 1000 de ori mai mică decât cea atinsă în aliajele metalice. Pe de altă parte însă, polimerii cu memorie (de tip polinorbornici, transpoliisoprenici, stiren-butadienici, poliuretani sau polietilenici) pot fi controlați nu numai termic ci și prin radiație luminoasă sau prin activitatea mediilor chimice [51], [60].

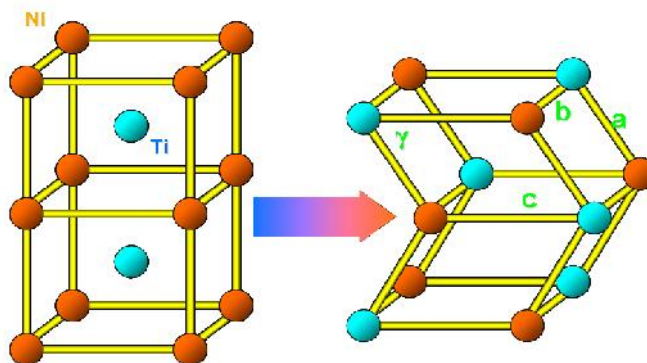


Figura 35. Deformarea straturilor necesară pentru schimbarea structurii cristaline

Fenomenul de „memorie a formei” este prezent la anumite aliaje cu transformare martensitică reversibilă în care martensita are un caracter termo-elastic (Figura 35). Un produs finit confecționat din astfel de materiale poate fi deformat de la o formă inițială, cu o configurație stabilă termic, până la o altă formă, cu o configurație instabilă termic. Acest produs se spune că are memoria formei pentru faptul că, la aplicarea unei încălziri, poate reveni de la configurația instabilă termic la configurația inițială, stabilă termic, adică se poate spune că „și amintește” forma inițială [28] [40].

La aliajele metalice, proprietatea de a avea memoria formei se bazează pe abilitatea materialului de a-și schimba structura cristalină (Figura 35), a faptului ca acestea prezintă o transformare reversibilă de la o stare austenitică la o stare martensitică (Figura 36), prin schimbarea temperaturii. Printre aliajele neferoase care au o martensită termoelastică reversibilă se pot enumera Au-Cd, Ti-Ni, In-Tl, Cu-Zn, Cu-Al-Ni, Cu-Zn-X, Ti-Ni-Cu, sau compuși Cu_3Al , Fe_3Pt , NiAl , $\text{Cu}_x\text{Au}_x\text{Zn}$ (apropiat de compoziția aliajului Heusler CuAuZn_2) [28].

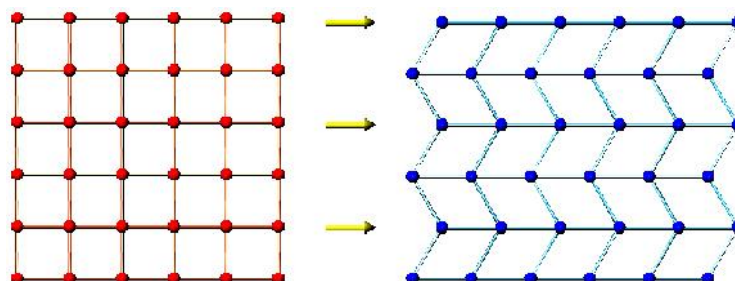


Figura 36. Aranjarea atomilor în timpul formării martensitei

Conceptual, obținerea proprietății de memoria formei presupune că un aliaj care se prezintă în stare martensitică în apropierea temperaturii ambientale (Figura 37) și care are o structură austenitică într-un domeniu mai larg de temperaturi, incluzând și temperatura ambientală, să poată prezenta o transformare de histerezis suficient de mare, peste 125°C .

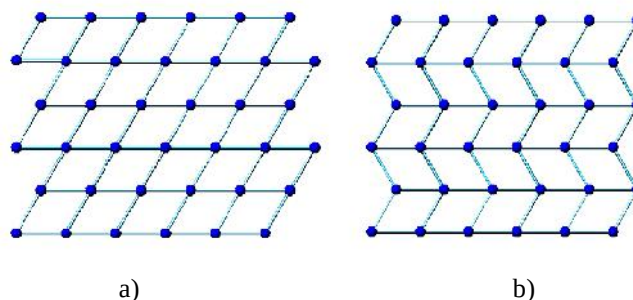


Figura 37. Aranjarea rețelei prin alunecare (a) și prin maclare (b)

Dacă histerezisul termic este suficient de mare și temperatura ambientală se situează în apropierea mijlocului acestui histerezis, atunci aliajul poate fi fabricat și depozitat (în mod convențional) și în stare martensitică (Figura 38). Cât timp histerezisul este suficient de mare, aliajul nu va putea să se transforme din stare martensitică în stare austenitică până ce nu se va interveni cu o încălzire superioară temperaturii ambientale. Încălzirea se va aplica numai după ce aliajul va fi instalat sau adus în condițiile de funcționare dorite.

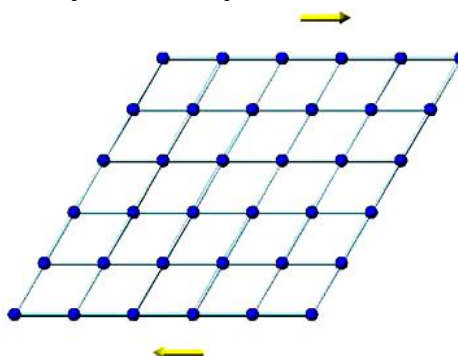


Figura 38. Martensită deformată în urma răcirii prin alunecarea straturilor

Fiind un domeniu relativ nou al tehnicii de vârf, datele referitoare la obținerea acestor materiale precum și aplicațiile lor sunt departe de a fi suficient cunoscute. Deși pe plan internațional se desfășoară numeroase cercetări în acest domeniu, rezultatele sunt în general publicate după apariția pe piață a noilor produse sau nici atunci, întrucât exista și se conservă monopolul de firmă al câtorva producători specializați din țări puternic dezvoltate, cum sunt SUA și Japonia [21].

Aplicațiile industriale ale materialelor cu memoria formei cuprind cuplaje și asamblări, antene spațiale, dispozitive termo-mecanice și termo-electrice, servo-mecanisme programate etc.

Pe măsura ce tehnologia a avansat, în cadrul schemelor funcționale, blocurile motoare constitutive au rămas relativ neschimbate. Motoarele, având o vechime de peste o sută de ani, sunt considerate și în zilele noastre ca favorite pentru a genera mișcare.

În unele aplicații însă, au apărut deja tehnologii revoluționare, aducând noi idei privind proiectarea, execuția și funcționarea dispozitivelor, transformând ceea ce părea de domeniul nerealizabilului în trecut în provocări demne de luat în considerare.

Gândindu-ne la problemele ingineresti care au fost abandonate datorită complexității calculului ce trebuiau efectuate, ele astăzi au devenit banale, fiind rezolvate cu ajutorul computerului pe baza programelor software de modelare și simulare, în câteva minute.

Astfel, nu atât de revoluționare precum computerele, aliajele cu memoria formei și-au dovedit deja valoarea certă în soluționarea unor diferite probleme ingineresti.

Descoperite doar acum câteva decenii, acest tip de materiale utilizate din ce în ce mai des pentru producerea mișcării, au reușit în numeroase aplicații să înlocuiască cu succes motoarele clasice datorită proprietății de a produce deplasări substanțiale cu un volum de material foarte redus. S-a deschis astfel o nouă direcție de orientare a tehnologiilor actuale, luând în considerare și nevoia permanentă de miniaturizare a dispozitivelor utilizate atât în robotică cât și în biomecanică, minichirurgie, vehicule de transport, componente hardware sau unități de monitorizare și recunoaștere.

Un alt avantaj al aliajelor cu memoria formei asupra actuatorilor clasici o reprezintă utilitatea lor foarte complexă. Un element din AMF se poate activa termic sau electric, nefiind necesar nici un alt element motric pentru a produce mișcare. Funcționarea acestora, constând doar din simpla contractare a materialului, le face să fie foarte utile în aplicații în care nu se admite un nivel ridicat de zgomot și vibrații [2] [8] [11].

De asemenea, actuatorii din AMF pot fi utilizați în același timp ca senzori termici sau arcuți superelastice, acest fapt conducând la reducerea atât a volumului necesar cât și a costurilor produsului finit.

Cel mai cunoscut tip de aliaj cu memoria formei care este utilizat în foarte multe aplicații în zilele noastre este aliajul format din Nichel și Titan, numit și NITINOL, acesta posedând o biocompatibilitate foarte ridicată.

2.5. Alegerea soluției constructiv-funcționale a dispozitivului de prehensiune acționat de actuatori cu elemente active din AMF

În urma sintezei bibliografice și analizei temeinice a caracteristicilor DP pentru realizarea obiectivelor propuse, se propune soluția constructiv funcțională prezentată în Figura 39.

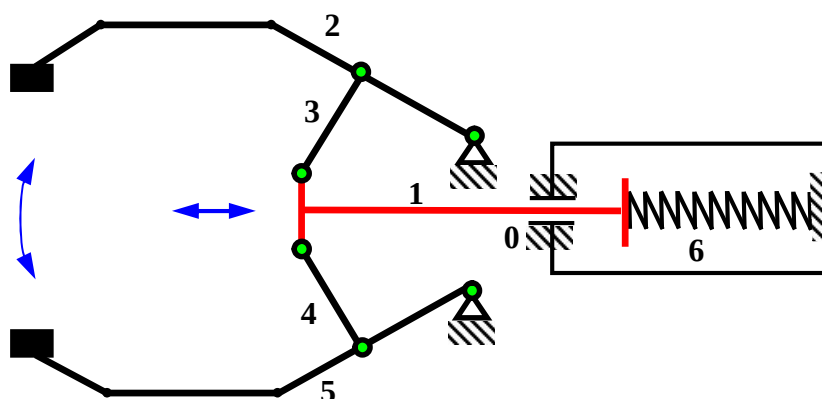


Figura 39. Schema structural-funcțională a dispozitivului de prehensiune

Conform schemei prezentate, dispozitivul de prehensiune propus este acționat de resortul activ din AMF (6) din componența actuatorului, care transmite mișcarea elementelor (3) și (4) prin intermediul elementului conducător (1), element care efectuează o mișcare rectilinie în cupla de translație 0. Elementele (3) și (4) sunt atașate prin cuple de rotație la o extremitate de elementul conducător (1), iar la cealaltă extremitate de efectorii finali (2) și (5).

2.6. Concluzii și contribuții personale

Datorită caracterului unic pe care îl are modelul de dispozitiv de prehensiune acționat de un actuator cu elemente active din aliaje cu memoria formei stabilit prin tema prezentei lucrări, precum și a multidisciplinarității impuse de proiectarea și realizarea unei astfel de tipologii constructiv - funcționale de actuator, a fost necesară o documentare amplă și diferențiată.

Prin analiza materialului bibliografic s-a dorit evidențierea clară a două obiective, respectiv analiza complexă și completă a tipologiilor de prehensori robotici în vederea reliefării aspectelor constructiv-funcționale ale efecturilor finali, precum și considerarea cât mai vastă și mai aprofundată a informațiilor cu privire la funcționarea și proprietățile aliajelor cu memoria formei.

Analiza diferitelor tipuri de dispozitive de prehensiune robotice a condus la evidențierea câtorva aspecte importante constructiv - funcționale, cu privire la precizia de poziționare a acestora și modul de control al acestora în funcție de modul de integrare practică, precum și la modalitățile de considerare și optimizare în sensul acționării și comenzii, precum și controlul histerezisului termic al elementelor active din componența dispozitivului propus.

Informațiile dobândite din studiul bibliografic se referă la modalitățile multiple de implementare, optimizare și control al elementelor active, reliefează aspecte importante care trebuie avute în vedere de-a lungul întregului proces de proiectare.

Contribuții personale

Contribuțiile personale constau în modul de cercetare, de selecție și de sintetizare a materialelor bibliografice studiate prin aplicarea unor metode de investigare științifică proprii, baza acestui mod constând în aplicabilitatea și relevanța celor mai noi rezultate ale cercetărilor în domeniul dispozitivelor de prehensiune și al aliajelor cu memoria formei, precum și structurarea reprezentativă a acestora pe clustere de competență.

În urma analizării diferitelor tipuri de dispozitive de prehensiune, s-a conceput și prezentat o schemă structurală a DP acționat de actuatori cu elemente active din aliaje cu memoria formei ce urmează a fi supusă proiectării, execuției și verificării experimentale.

3. CAPITOLUL III. CERCETĂRI PRIVIND PARAMETRII CONSTRUCTIVI ȘI FUNCȚIONALI AI ACTUATORILOR CU ELEMENTE ACTIVE DIN ALIAJE CU MEMORIA FORMEI

3.1. Generalități privind actuatorii cu elemente active din aliaje cu memoria formei

Deoarece avem posibilitatea de a alege și / sau de a proiecta diferite structuri de roboți industriali în construcție modulară, odată ce datele concrete ale aplicației au fost determinate vom proceda la determinarea structurii optime din punct de vedere al aplicației respective.

Primul pas constă din determinarea mișcărilor elementelor componente ale traiectoriei impuse efectorului final. Se trece apoi la optimizarea traiectoriei folosind următorul set de reguli simple :

- minimizarea numărului de orientări ale DP în scopul reducerii numărului de cuple cinematice necesare și în general a gradului de complexitate al robotului industrial;
- reducerea la maximum a greutateii obiectului manipulat;
- reducerea volumului spațiului de lucru;
- alegerea structurii cu cel mai scăzut consum energetic în scopul micșorării costurilor;
- simplificarea sistemului de programare; (de exemplu alegerea sistemului punct cu punct în locul controlului continuu al traiectoriei, acolo unde este posibil) ;
- minimizarea numărului de senzori;
- folosirea la maximum a posibilităților existente în scopul reducerii costului DP și a timpului necesar îndeplinirii acțiunii.

În funcție de natura efectului de memorare a formei indus în actuator, la răcirea sub temperatura M_f forma acestuia poate să rămână nemodificată sau poate lua din forma deformată . În primul caz, numit efect cu singur sens (one - way), efectul de memorare a formei poate fi reactivat printr-o deformare a probei, întrucât în acest caz aliajul memorează doar forma corespunzătoare temperaturilor înalte, iar după încălzirea care determină revenirea la această formă memorată, „uită” forma corespunzătoare temperaturilor joase.

În cel de-al doilea caz, în actuator este indus efectul de memorare a formei dublu-sens (two - way), atât a celei la temperaturi înalte, cât și a celei la temperaturi joase.

Semnalul de intrare este transformat totdeauna în efort, care poate fi folosit pentru a introduce mișcare (dinamică) într-un sistem. Aceste materiale constituie grupul cel mai des folosit pentru a construi o structură inteligentă (materiale active integrate într-o structură mecanică), cu scopul de a modifica dimensiunile geometrice ale structurilor.

Avantajele utilizării aliajelor cu memoria formei sunt:

- în raport cu bimetaletalele termostactice - dezvoltă forțe mai mari și curse (de până la 200 ori) mai mari precum și deplasări mai variate (în comparație cu încovoierea);
- în raport cu actuatorii cu parafină - timpii de reacție sunt mai reduși și forma constructivă este mult mai simplă;

- au o capacitate mult mai ridicată de înmagazinare a energiei pe unitatea de volum: $(6-25) \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$.

Pe lângă forma de resort elicoidal, actuatorii termici cu memoria formei pot fi: arcuri spirale; sârme; lamele; bare de torsiune, bare de încovoiere sau compresii etc.

Randamentul actuatoarei cu elemente active din aliaje cu memoria formei se poate calcula cu ajutorul relației [20]:

$$\eta = \frac{(\varepsilon_A - \varepsilon_M) \cdot (\pm_{\max} - \pm_{\min})}{\rho \cdot C \cdot \left(\Delta T + \frac{\pm_{\max} - \pm_{\min}}{d\pm/dT} \right) + d\pm/dT (\varepsilon_A - \varepsilon_M) \left(M_s + \Delta T + \frac{\pm_{\max}}{d\pm/dT} \right)} \quad 3.1$$

în care: $\varepsilon_{a, m}$ - deformația în starea austenitică, respectiv martensitică;

$\sigma_{\max, \min}$ - tensiunea maximă, respectiv minimă;

ρ - densitatea;

C - căldura specifică;

ΔT - histerezisul termic;

$d\sigma / dT$ - viteza de tensionare.

Din analiza rezultatelor experimentale obținute anterior s-a putut observa că amplitudinea deplasării obținute poate avea valori mai ridicate prin creșterea curentului de încălzire și totodată prin scăderea frecvenței acțiunilor. Însă o metodă mai optimă de răcire ar putea îmbunătăți simțitor amplitudinea deplasării ciclice obținute și a regimului de lucru al întregului actuator.

În vederea menținerii unui sistem de control cât mai riguros a poziționării degetelor în timpul funcționării este indicat a se utiliza un controller proporțional-integral (IP), iar pentru reducerea la minim a riscurilor de distrugere a sistemului se va adopta o metodă de control în două faze.

3.1.1. Alegerea formei geometrice a elementelor active din AMF

Unul din avantajele utilizării AMF ca elemente active ale unui actuator îl reprezintă faptul că acestea se pot concepe în forma geometrică caracteristică fiecărei aplicații. În mod uzual însă, pentru evitarea unor costuri prea ridicate necesare „educării” elementelor active și datorită limitărilor de forță și deplasare (Figura 40), sunt evitate formele non-convenționale. Există totuși posibilitatea utilizării și a formelor non-convenționale, dar acestea nu constituie scopul acestei lucrări.

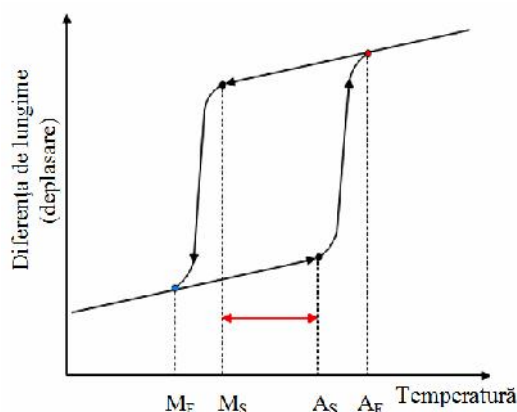


Figura 40. Diagrama deplasare – temperatură pentru elemente din AMF

Astfel, formele convenționale utilizate sunt firele, filme sau platbande, sau resorturi de diferite forme (lamelare, elicoidale, etc.) Pentru proiectarea diferitelor tipuri de actuatori au fost luate în calcul doar formele convenționale pentru calculul elementelor active.

3.1.1.1. Fire din AMF

Firele din aliaje cu memoria formei sunt forma cea mai comună întâlnită în utilizarea AMF pentru elemente active. Comparate cu celelalte forme, firele conferă cea mai mare forță dezvoltată în raport cu aria secțiunii transversale. Valori aproximativ egale se regăsesc și în cazul platbandelor și a filmelor. Firele sunt caracterizate de o comportare liniară în ceea ce privește raportul forță-deplasare în intervalul de temperatură $M_f - A_f$ (Figura 39).

În cazul în care parametrii care se cunosc sunt forța și deplasarea (oferiți de fabricant pentru gama standard de fire fabricate), efortul unitar reprezintă raportul dintre forța dezvoltată și suprafața secțiunii transversale a firului, și se calculează cu relația:

$$\pm = \frac{F}{A_{ST}} \quad 3.2$$

în care $\pm$ [N/mm²] reprezintă valoarea maximă admisibilă a efortului unitar iar F [N] este forța necesară pentru a fi dezvoltată.

Această valoare $\pm$ este durata de viață a elementului cu memorie sau numărul de cicluri care actuatorul îl poate efectua. Trebuie menționat faptul că în cazul depășirii limitei superioare a temperaturii A_f , oboseala elementului crește exponențial, deci trebuie avut în vedere un control cât mai riguros al temperaturilor regimului de lucru, în caz contrar, durata de viață a actuatorului fiind destul de redusă. În cazul unei utilizări precise, elementul activ poate oferi însă sute de mii de cicluri.

Pentru un fir, calculul ariei secțiunii transversale se face cu relația:

$$A_{ST} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad 3.3$$

Înlocuind 3.3 în 3.2, obținem:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \pm}} \quad 3.4$$

Lungimea necesară a firului este dată de relația 3.5

$$L = \frac{S}{\Delta \epsilon} \quad 3.5$$

în care S [mm] reprezintă deplasarea iar $\Delta \epsilon$ reprezintă diferența de tensiunile longitudinale dezvoltate la temperaturile de lucru a elementului, respectiv temperatura joasă și cea ridicată.

$$\Delta \epsilon = \epsilon_J - \epsilon_R \quad 3.6$$

Atât temperatura de lucru joasă A_S cât și cea ridicată A_F (Figura 40) sunt niște parametri care limitează numărul de cicluri de funcționare a actuatorului. Pentru Nitinol, această valoare poate fi de 8% pentru doar un număr foarte limitat de cicluri. În schimb, dacă valoarea considerată este de 5%, durata de funcționare a actuatorului va fi de mii de cicluri pentru exact aceleași dimensiuni ale firului. Este foarte important de reținut aceste valori, care sunt diferite pentru fiecare tip de aliaj. În cazul unui aliaj de tip Ni-Ti-Cu, pentru aceleași dimensiuni ale firului și o valoare de 5%, numărul de cicluri va fi cu mult mai mic față de Nitinol (Ni-Ti).

Din expresia legii lui Hooke, se obține valoarea efortului unitar longitudinal la temperatură ridicată (A_F) :

$$\epsilon_R = \frac{\pm_R}{E_R} \quad 3.7$$

în care E_R reprezintă modulul de elasticitate Young al materialului la temperatură ridicată.

Valoarea alungirii firului la temperatură ridicată se calculează cu relația:

$$L_R = \epsilon_R \cdot L \quad 3.8$$

Utilizând încă o dată relația lui Young, dar în acest caz la temperatură scăzută, valoarea tensiunii longitudinale devine:

$$\pm_J = \epsilon_J \cdot E_J \quad 3.9$$

Dacă se consideră că elementul din aliaj cu memoria formei este cu efect de dublu sens al memoriei, valoarea totală a forței de revenire în starea martensitică inițială devine:

$$F_T = \pm_J \cdot A_{ST} \quad 3.10$$

3.1.1.2. Filme și platbande din AMF

Elementele active ce constau din filme sau platbande de AMF (Figura 40) dezvoltă, așa cum s-a menționat deja, aproximativ aceeași forță dezvoltată raportată la aria secțiunii transversale. Spre deosebire totuși de fire, avantajul acestora constă în faptul că aria secțiunii transversale este mult superioară firelor, deci am putea chiar considera aceste elemente ca o multitudine de fire alăturate, deci forța dezvoltată de aceste elemente este net superioară față de cea dezvoltată de fire.

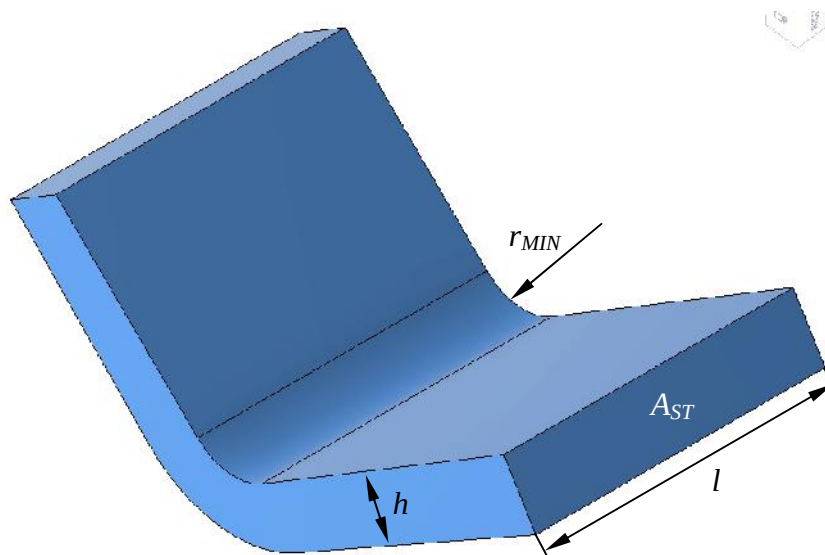


Figura 41. Element activ din AMF tip platbandă

Ca dezavantaj însă apare, tot datorat valorii mai ridicate a secțiunii transversale, modalitatea de încălzire, aceasta necesitând curenți electrici de activare cu valori mult superioare față de cele utilizate pentru activarea firelor, deci implicit și creșterea duratei până la atingerea temperaturii M_F , precum și necesitatea învingerii inerției termice în timpul răcirii elementelor active, fapt ce generează o rată mai scăzută de ciclu global pentru elementul activ.

Pentru un elementele active considerate, fie că acestea sunt filme subțiri, fie că sunt platbande, calculul ariei secțiunii transversale se face cu relația:

$$A_{ST} = l \cdot h \quad 3.11$$

Pentru elementele tip platbanda, mai intervine în calcule și parametrul definit de relația 3.12

$$R_{LH} = \frac{l}{h} \quad 3.12$$

Acest parametru reprezintă raportul dintre lățimea platbandei și înălțimea acesteia. Acest parametru este oarecum restricționat de fabricanții de elemente din AMF, și de regulă are valoarea cuprinsă între 10 și 15.

În cazul platbandelor, este de preferat ca înălțimea să fie cât mai redusă, considerent datorat unui proces mai ușor de educare a elementului activ, la filmele din AMF fiind mult mai ușor de realizat procedeele de educare în vederea obținerii efectului de memorie.

Un alt factor ce trebuie considerat este raza minimă de curbură la îndoire. Trebuie ținut cont de faptul ca tensiunile ce apar pe aria suprafeței care se curbează sunt oricum mai mari decât pe restul suprafeței, fapt ce reduce substanțial durata de viață a elementului din AMF.

Relația ce definește acest parametru este prezentată în relația:

$$r_{MIN} = 50 \cdot h \quad 3.13$$

Astfel, înlocuind în relația 3.11, acesta devine:

$$A_{ST} = R_{LH} \cdot h^2 \quad 3.14$$

De unde se poate calcula valoarea înălțimii platbandei după cum urmează:

$$h = \sqrt{\frac{F}{\pm \cdot R_{LH}}} \quad 3.15$$

Valoarea lățimii platbandei devine:

$$l = R_{LH} \cdot h$$

Restul ecuațiilor necesare determinării parametrilor elementelor active de tip film sau platbandă sunt similare cu cele definite pentru calculul elementelor de tip fir, respectiv relațiile 3.5-3.10.

3.1.1.3. Arcuri elicoidale de compresiune din AMF

Spre deosebire de elementele din AMF prezentate anterior, arcurile din AMF, fie ele de compresiune sau de tracțiune, pot dezvolta o forță de mișcare suficient de mare în timp ce deplasarea determinată de revenirea la forma indusă poate fi de asemenea substanțială. Este necesară de asemenea o monitorizare foarte precisă a parametrilor de lucru în limitele prescrise, în caz contrar durata de viață a arcurilor fiind diminuată considerabil, fapt datorat și tensiunilor relativ mari ce apar în firul din care e confecționat arcu în momentul revenirii acestuia la forma indusă inițial.

Pornind de la o metodologie relativ incipientă de calcul a elementelor de tip resort dezvoltată de Waram [101], [102], s-a procedat la dezvoltarea unei metode novative de calcul de dimensionare a elementelor de tip arc elicoidal din AMF, atât pentru cele de compresiune cât și pentru cele de tracțiune, prezentată în ceea ce urmează.

Arcul de compresiune din AMF (Figura 42) este reprezentat dimensional în cele două faze în care se regăsește în timpul funcționării acestuia, respectiv faza inițială (culoare albastră, denumită și faza rece, - elementul are temperatura mediului ambiant), fază în care arcul a fost comprimat mecanic și are lungimea minimă L_R , și faza în care arcul, prin încălzire, a revenit la forma memorată inițial, dezvoltând deja forța maximă de întindere F pentru a ajunge la lungimea maximă L_R (culoare roșie, denumită și faza caldă - elementul se găsește încălzit la temperatura maximă admisă).

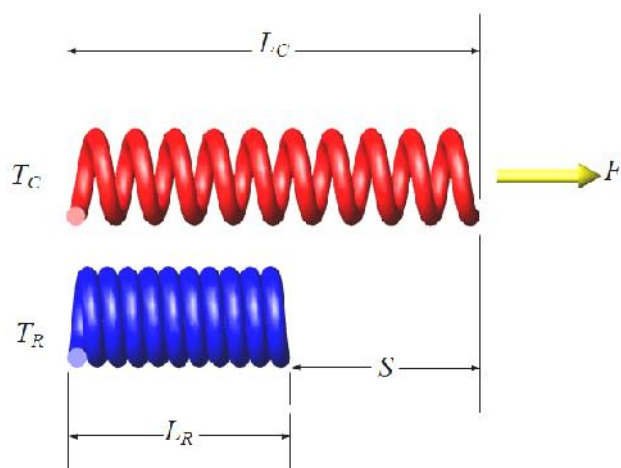


Figura 42. Dimensiunile arcului elicoidal de compresiune din AMF

Expresia efortului unitar de forfecare într-un arc este dată de relația:

$$\tau = \frac{8 \cdot F \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot K = \frac{8 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \cdot C \cdot K \quad 3.16$$

în care F reprezintă valoarea forței axiale aplicate, D este diametrul mediu al arcului, d reprezintă diametrul firului din care e confecționată spirala, K este un factor de corecție iar C este constanta arcului (relația 3.17).

$$C = \frac{D}{d} \quad 3.17$$

Cu excepția factorului de corecție K , ecuația 3.16 reprezintă valoarea efortului unitar de torsiune pentru o bară solidă. Factorul de corecție K , cunoscut și sub numele de factorul de corecție Wahl, corectează efortul unitar de forfecare funcție de efortul unitar transversal și cel de torsiune ce apar de asemenea în arc, având valoarea:

$$K_w = \frac{4 \cdot C - 1}{4 \cdot C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad 3.18$$

Expresia acestui coeficient de corecție se recomandă pentru utilizare în cazul calculului pentru oboseală, în timp ce pentru încărcări statice s-a dovedit o mai mare acuratețe a rezultatelor obținute prin folosirea expresiei din relația:

$$K = 1 + \frac{0,5}{C} \quad 3.19$$

Datorită limitărilor impuse de solicitarea la oboseală, care are un rol crucial în reducerea duratei de viață și/sau a numărului de cicluri efectuate de arcul de compresiune din AMF, se impune un prag maximal pentru valoarea efortului unitar de forfecare² funcție de tipul aplicației în care arcul este utilizat.

Din relația 3.16 se pot obține multiple valori ale diametrului firului d , pentru care constanta arcului C se situează în intervalul 3-12.

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot F \cdot C \cdot K}{\mathbb{R} \cdot 2}} \quad 3.20$$

Există doi factori care se referă de constanta arcului C necesari pentru proiectarea arcului: viteza ciclurilor și volumul total ocupat de arc. Din moment ce viteza ciclurilor este un parametru ce depinde de diametrul d al firului, se poate determina valoarea constantei arcului C pentru a obține viteza dorită. De regulă, furnizorii de AMF furnizează tabele pentru diferitele diametre la care livrează firele, ca de exemplu cele prezentate în Tabelul 3 [101].

Tabel 3. Timpii de reacție pentru diametre diferite de fire Flexinol în aer liber

Denumire	Flexinol 025	Flexinol 050	Flexinol 100	Flexinol 150	Flexinol 250
Diametru (μm)	25	50	100	150	250
Viteza maximă de contracție (sec)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Viteza de relaxare (sec)	0.1	0.3	0.8	2	5.5
Viteza de ciclu	55	46	33	20	9

Determinarea constantei arcului C funcție de cel de-al doilea factor, respectiv volumul total al arcului, se calculează funcție de diametrul exterior al spiralei arcului și de lungimea acesteia.

Diametrul mediu al arcului se obține din relația:

$$D = C \cdot d \quad 3.21$$

Diametrul interior și cel exterior al spiralei arcului au expresiile:

$$D_{INT} = D - d \quad 3.22$$

$$D_{EXT} = D + d \quad 3.23$$

Numărul de spire se calculează cu relația:

$$n = \frac{d \cdot S}{\mathbb{R} \cdot D^2 \cdot \Delta\mathbb{F}} = \frac{S}{\mathbb{R} \cdot D \cdot C \cdot \Delta\mathbb{F}} \quad 3.24$$

în care S reprezintă cursa arcului între faza inițială și faza memorată, iar $\Delta\mathbb{F}$ reprezintă diferența de tensiuni dintre cele două faze.

Lungimea maximă L_S a arcului este:

$$L_C = L_R + S \quad 3.25$$

Lungimea liberă L_L a arcului este definită de relația:

$$L_L = L_C + \mathbb{C}_C \quad 3.26$$

Pentru arcurile cu efect simplu de memoria formei, valoarea forței de revenire la starea memorată este dată de relația:

$$F_R = k_R \cdot \mathbb{C}_R \quad 3.27$$

Volumul ocupat de arc este dat de valorile suprafeței ariei ocupate de arc (relația 3.28) și înălțimea arcului (relația 3.29):

$$A_C = \frac{\mathbb{R} \cdot D_{EXT}^2}{4} \quad 3.28$$

$$V_C = \frac{\mathbb{R} \cdot D_{EXT}^2}{4} \cdot L_C \quad 3.29$$

În cazul în care se dorește obținerea unui volum precis al arcului activ din AMF, se recomandă o iterație pentru a putea evalua cea mai optimă valoare pentru constanta arcului C .

3.1.1.4. Arcuri elicoidale de tracțiune din AMF

Spre deosebire de arcul de compresiune (Figura 43), funcționarea arcului de tracțiune din AMF este total opusă. Reprezentarea acestuia s-a efectuat tot în cele două faze în care se regăsește arcul în timpul funcționării acestuia, respectiv faza inițială (culoare albastră, denumită și faza rece, - elementul are temperatura mediului ambiant), fază în care arcul a fost întins mecanic și are lungimea maximă L_R , și faza în care arcul, prin încălzire, a revenit la forma memorată inițial, dezvoltând forța maximă de tracțiune F pentru a ajunge la lungimea minimă L_C (culoare roșie, denumită și faza caldă - elementul se găsește încălzit la temperatura maximă admisă). Se observă faptul că deplasarea efectuată și forța dezvoltată de arcul din AMF sunt contrare cu cele ale arcului de compresiune.

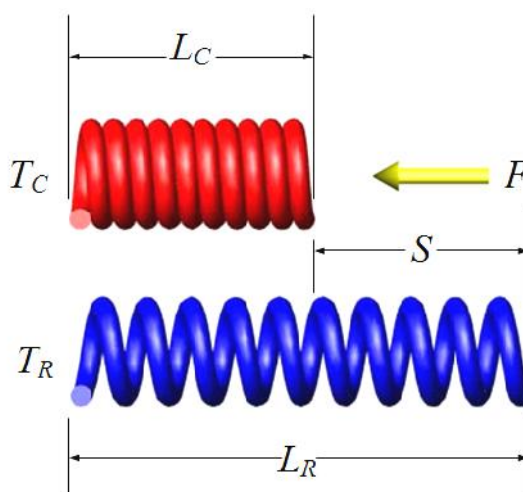


Figura 43. Dimensiunile arcului elicoidal de tracțiune din AMF

Ca și în cazul arcurilor de compresiune, solicitarea la forfecare în faza martensitică (la temperatura ambiantă) afectează durata de viață a arcului din AMF, deci trebuie menținută sub valoarea limitei admisibile. În schimb, valoarea acesteia în cazul fazei austenitice, atunci când temperatura atinge valoarea la care arcul revine la forma indusă inițial, se poate obține din diagrama tensiune-deformație ce conține caracteristicile de material pentru faza austenitică (Figura 44). O altă metodă pentru determinarea acestei valori este de a considera comportarea tensiune - deformație ca fiind una liniară, caz în care solicitarea la forfecare se poate determina utilizând efortul de forfecare τ_C și modulul de elasticitate transversal G_C .

$$\Delta\gamma = \gamma_R - \gamma_C \quad 3.30$$

$$\gamma_C = \frac{\tau_C}{G_C} \quad 3.31$$

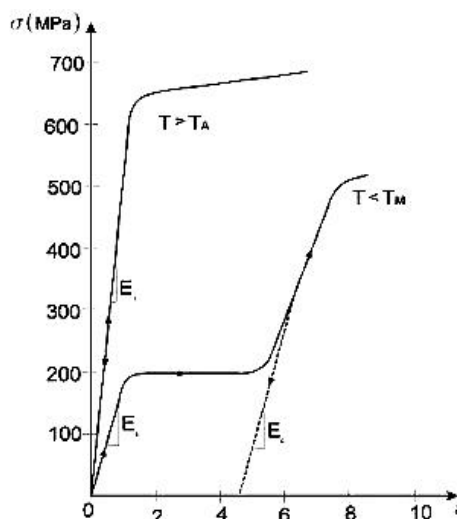


Figura 44. Diagrama tensiune-deformație pentru Nitinol
Sursa: [16]

Constanta arcului pentru cele două faze are valorile:

$$k_C = \frac{G_C \cdot d^4}{8 \cdot n \cdot D^3} = \frac{G_C \cdot d}{8 \cdot n \cdot C^3} \quad 3.32$$

$$k_R = \frac{G_R \cdot d^4}{8 \cdot n \cdot D^3} = \frac{G_R \cdot d}{8 \cdot n \cdot C^3} \quad 3.33$$

Utilizând constanta arcului, se poate calcula săgeata arcului la temperatura maximă conform relației:

$$\Phi_C = \frac{F}{k_C} \quad 3.34$$

Din moment ce deplasarea arcului S este diferența săgeților arcului pentru cele două faze, rezultă expresia săgeții arcului la temperatura ambiantă ca având valoarea:

$$\Phi_R = S + \Phi_C \quad 3.35$$

Lungimea arcului în faza revenirii acestuia este dată de relația:

$$L_R = d \cdot (n + 3) \quad 3.36$$

Cu excepția formulelor de calcul pentru determinarea celor două lungimi L_C și L_R , care sunt diferite pentru arcurile de tracțiune, toate celelalte ecuații utilizate pentru calculul diametrului arcului, a numărului de spire, a vitezei ciclurilor și a forței dezvoltate pentru revenire sunt identice cu cele determinate în cazul arcurilor de compresiune.

Lungimea minimă la care poate reveni arc este dată de relația:

$$L_M = d \cdot (n - 1) \quad 3.37$$

în care n este numărul de spire al arcului.

Lungimea liberă a arcului, sau altfel spus lungimea în faza în care intervine efectul de memorie exprimată funcție de lungimea minimă are valoarea:

$$L_L = L_M + 2 \cdot D_{INT} \quad 3.38$$

Când este încălzit, arc va avea deci o lungime:

$$L_C = L_L + \Phi_C \quad 3.39$$

În urma laborioaselor calculele efectuate de către autor pentru determinarea posibilelor forme geometrice convenționale ale elementelor active în vederea implementării acestora în componența actuatorului, a analizării și comparării rezultatelor obținute, s-a dovedit că forma care corespunde cerințelor impuse în vederea obținerii unei viteze de deplasare cât mai ridicată și dezvoltarea unei forțe motrice cât mai mare o reprezintă arcurile din AMF.

Parametrii actuator		Parametrii arcului		Parametrii materialului	
Forță	U. M.	Tipul arcului		Modulul la temperatură ridicată	U. M.
4,5	N	Compresiune		20.700	MPa
Deplasare	U. M.	Constanta arcului		Modulul la temperatură ambiantă	U. M.
9	mm	6		2.700	MPa
Unități de măsură rezultate		Rezultate			
Lungime	mm	Lungime la temperatură ridicată			
Diametru	mm	Lungime liberă			
Forță	N	Forța de revenire			
Sarcina	Pa	Diametru arc			
Temperatură	C	Diametru fir			
		27,23			
		35,10			
		1,48			
		4,2			
		3,15			

Figura 45. Calculator pentru dimensionarea arcurilor din AMF

Drept pentru care, în vederea proiectării cu cât mai mare acuratețe a arcurilor pentru actuator, fiind necesare efectuare a multor iterații pentru a putea obține varianta optimă nu doar din punct de vedere funcțional, cât și al unei durate de viață cât mai mari și implicit, efectuarea a câtorva mii de cicluri de funcționare, s-a procedat la elaborarea unei aplicații capabile să calculeze caracteristicile arcurilor din AMF.

În Figura 45 este prezentată aceasta aplicație de calcul, elaborată în programul Microsoft - Excel. Acest program de calcul complex ia în considerare ca bază de calcul toate variabilele regăsite în subcapitolele prezentate anterior, datele de intrare situându-se în zona marcată cu culoarea galben. Valorile utilizate ca date de intrare pentru definirea caracteristicilor geometrice ale arcurilor referitoare la caracteristicile actuatorului sunt forța care se dorește a fi dezvoltată de arc, deplasarea ce urmează a fi efectuată. Parametri de intrare referitori la arc sunt tipul arcului (compresiune sau tracțiune) și constanta arcului. Ca parametri de intrare referitori la natura materialului este necesar a se introduce valorile modulului de elasticitate la temperatura ambiantă și la temperatura de activare a AMF, sarcina la temperatura de activare și alungirea relativă la temperatură ambiantă.

Rezultatele de ieșire, prezentate în zona marcată cu culoarea verde, relevă valorile dimensiunilor arcului, acestea fiind lungimea arcului la, lungimea la temperatură ambiantă și temperatura de activare, forța de revenire, diametrul firului din care este construit arc, diametrul arcului și volumul ocupat de arc.

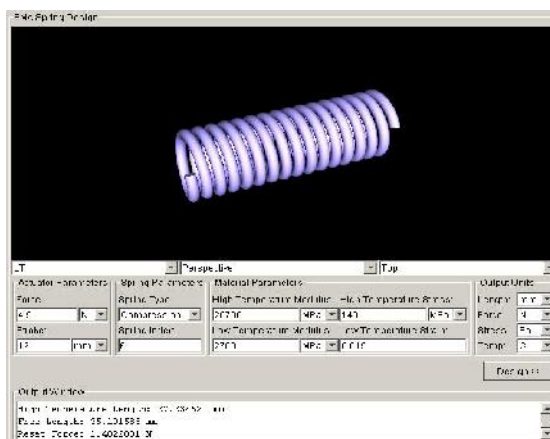


Figura 46. Aplicație Java de vizualizare 3D a arcurilor din AMF

Totodată, trebuie menționat faptul ca rezultatele obținute prin aplicația de calcul realizată de autor în programul Microsoft - Excel au constituit baza de calcul pentru o aplicație construită în Java (Figura 46), aplicație care oferă posibilitatea vizualizării modelului 3D a arcului proiectat și dimensionat.

3.1.2. Variante constructive de actuatori cu elemente active din aliaje cu memoria formei

Pentru o cât mai bună posibilitate de a alege aliajul din AMF cu proprietățile optime pentru a satisface obiectivele propuse anterior în ceea ce privește actuatorul, s-au avut în vedere trei tipuri de aliaje cu memoria formei, respectiv Ni - Ti, Cu - Zn - Al și Cu - Al - Ni, acetse trei tipuri fiind aliajele ce se pretează scopului propus.

Caracteristicile tipice care pot fi utilizate pentru calculul randamentului actuatorului (Relația 3.1) pentru cele trei tipuri de aliaje sunt prezentate în Tabelul 4.

Tabel 4. Caracteristicile tipurilor de AMF studiate

Nr. Crt.	Caracteristica		Unitatea de măsură	Aliajul		
				Ni - Ti	Cu - Zn - Al	Cu - Al - Ni
1.	Densitatea		kg/m ³	6400-6500	7800-7900	7000-7200
2.	Căldura specifică		J/kg·K	470-620	390	400-480
3.	Limita de curgere	austenită	MPa	200-800	150-300	150-300
		martensită		150-300	150-300	150-300
4.	Alungirea la rupere	austenită	%	15-20	10-15	5-6
		martensită		40-50		8-10
5.	Histerezisul termic		K	20-30	10-20	20-30
6.	Viteza de deformare		MPa/K	3-20	2,5-6	-
7.	Temperaturile critice M _s		K	173-373	73-373	73-473

În urma analizei comparative efectuate, tipul de aliaj ales pentru executarea elementelor active ale actuatorului a fost Nitinolul [122], atât datorită proprietăților sale fizice și comportamentale, în principal superioritatea rezistivității electrice și a comportării la oboseală superioare, cât și din considerente financiare.

Pentru aliajele cu memoria formei, siguranța în funcționare depinde de durata de viață. În vederea obținerii unei durate de viață cât mai îndelungate, trebuie considerați toți parametrii externi, respectiv durata de funcționare a unui ciclu, temperatura, tensiunea, deformarea, modul de deformare sau numărul de cicluri.

Parametri interni care influențează durata de viață sunt compoziția aliajului, sistemul de aliere, tratamentele termice aplicate și procesarea materialului.

Referitor la Nitinol, carateristica de rezistență la oboseală funcție de sarcina la care e supus elementul și deformarea maximă este prezentată în Tabelul 5.

Tabel 5. Caracteristici de degradare și oboseală pentru aliajul Nitinol [5]

Număr de cicluri	Deformare maximă	Sarcină maximă
1	8 %	500 N/mm ²
100	4 %	275 N/mm ²
10 000	2 %	140 N/mm ²
100 000+	1 %	70 N/mm ²

Trebuie de menționat faptul că unele tratamente termice speciale aplicate sau îmbunătățirea aliajului Ni-Ti cu alte elemente, ca de exemplu cupru, pot oferi performanțe superioare. De asemenea, prin înglobarea elementelor cu memoria formei în matrici polimerice sau matrici polimerice compozite, se dezvoltă un nou material care poate avea caracteristicile de memoria formei net superioare, chiar cu proprietăți de „reparare” a structurii, dar acestea nu constituie obiectul acestei teze de doctorat.

În tabelul 6 sunt prezentate proprietățile acestui aliaj Nichel [5].

Tabel 6. Proprietățile aliajului cu memoria formei Ni-Ti

Proprietate	Unitate de măsură	Ni-Ti
PROPRIETĂȚI FIZICE		
Punct de topire	°Celsius	1240-1310
Densitate	g/cm ³	6.4-6.5
Conductivitate termică la 20 ⁰ C	W/(m·K)	10-18
la temperatura austenitică	W/(m·K)	18
la temperatura martensitică	W/(m·K)	8.6
Coeficientul de expansiune termică	(E ⁻⁶)/K	6.6-10
la temperatura austenitică	(E ⁻⁶)/K	10-11
la temperatura martensitică	(E ⁻⁶)/K	6.6
Căldura specifică	J/(kg·K)	470-620
Entalpia de transformare	J/kg	19000
Performanța la coroziune	*	similară cu ale oțelurilor Inox seria 300, comparabile cu ale Titanului pur
Compatibilitate biologică	*	excelentă
Rezistența la uzură	*	bună
PROPRIETĂȚI MECANICE		
Modulul lui Young	GPa	70-98
la temperatura austenitică	GPa	97
la temperatura martensitică	GPa	/
Modulul de elasticitate G (austenită)	GPa	27
Limita de curgere	N/mm ²	410
la temperatura austenitică	N/mm ²	200 - 800
la temperatura martensitică	N/mm ²	150 - 300
Rezistența de rupere la tracțiune	N/mm ²	800 - 1100
a martensitei	N/mm ²	700 - 1100 (recopt) 1300 - 2000 (nerecopt)
Alungirea la rupere	%	40 - 50
la temperatura austenitică	%	15 - 20
la temperatura martensitică	%	30 - 50
Rezistența la oboseală N=1 000 000	N/mm ²	350
Mărime grăunte	μm	20 - 100
Anisotropie elastică	*	2
PROPRIETĂȚI ELECTROMAGNETICE		
Rezistivitate	(E ⁻⁶)·Ohm·m	0,7-1,0
la temperatura austenitică	(E ⁻⁶)·Ohm·m	1
la temperatura martensitică	(E ⁻⁶)·Ohm·m	0.8
Putere termo-electrică	(E ⁻⁶)·V/K	9 - 13 (martensită), 5 - 8 (austenită)
Permeabilitate magnetică	*	< 1.002
Susceptibilitate magnetică	emu/g	3.106
PROPRIETĂȚI DE MEMORIA FORMEI		
Temperaturi de transformare	°Celsius	-100 to 100
Histerezis	°Celsius	20 - 30
Deformare memorie simplu sens	%	8
când N<100	%	6 - 8

$N < 10\ 000$	%	2
$N < 1\ 000\ 000$	%	0,5
Deformare memorie cu dublu sens	%	5
când $N < 100$	%	6
$N < 100\ 000$	%	2
$N < 10\ 000\ 000$	%	0,5
Temperatură maximă (maxim o oră)	°Celsius	400
Capacitate de amortizare	% SDC	15 - 20
Alungire pseudo-elastică	%	/
A unui singur cristal	/	10
A poli-cristalelor	/	10
Stocare energie super-elastică	J/g	6,5
Tensiune maximă de revenire	N/mm ²	500-900
Deformare la revenire	%	8

3.1.2.1. Varianta constructivă cu elemente de tip fir cu simplu sens de memorie

Prima variantă constructivă a constat în utilizarea unui fir de NiTi (49,8% Titan), având ca și temperaturi de transformare: temperatura de început al austenitizării $A_s = 25,5^0\text{ C}$, temperatura de sfârșit al austenitizării $A_s = 46,5^0\text{ C}$, temperatura de început al martensitei $M_s = 10^0\text{ C}$ și temperatura de sfârșit al martensitei $M_s = -14,5^0\text{ C}$. Firul de aliaj primar de NiTi a fost recopt la o temperatură între 400^0 C și 650^0 C de-a lungul unei perioade de 0,5 - 2 ore pentru a adapta temperaturile de transformare de fază pentru efectul de memorie.

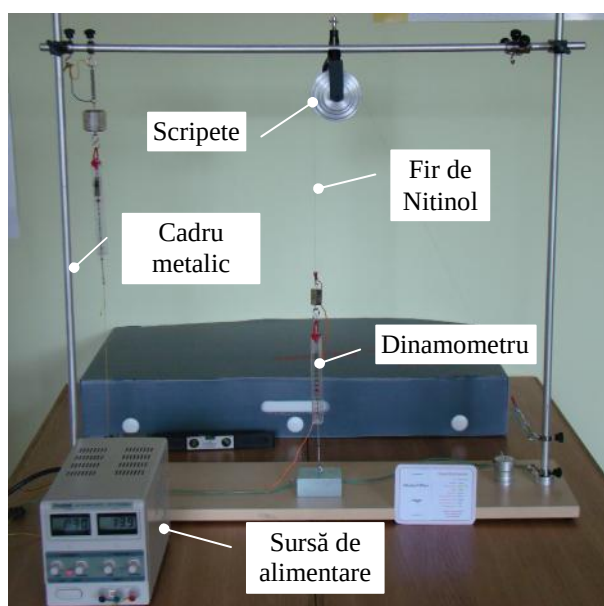


Figura 47. Stand experimental pentru testarea firului de Nitinol

Pentru testare, s-a conceput și realizat un stand experimental prezentat în Figura 47, compus dintr-un suport cadru metalic din aluminiu pentru fixarea unui scripete peste care a fost trecut firul din Nitinol. Un capăt al firului s-a fixat de suportul cadru pe laterala acestuia, iar la capătul opus a fost fixat un dinamometru pentru măsurarea forței dezvoltate și a deplasării efectuate de acesta.

Au fost testate fire de Nitinol cu lungime de 800 de milimetri și diametre diferite (Tabelul 7). Firul cu diametru cel mai mare (0,250 mm), capabil să dezvolte o forță de revenire de 9,12 N, a fost fixat la un capăt, trecut peste un scripete, de capătul liber fiind agățată o greutate de 100 de grame. (greutatea maximă admisă fiind de 172 grame).

Prin încălzirea firului cu un curent de o intensitate de 1,00 mA (firul având o rezistență electrică de 20 Ω /m) în intervalul de temperatură 70⁰ - 90⁰ C, greutatea a fost ridicată 32 de mm.

Tabel 7. Caracteristici ale firelor de Ni-Ti testate

Diametru [mm]	Rezistență electrică [Ω / m]	Forță de tracțiune maximă [N]	Curent de activare la 22°C [mA]	Timp contracție [s]	Timp de repaos 70°C (A _S) [s]	Timp de repaos 90°C (A _F) [s]
0,100	3	1,47	150	1	0,8	0,4
0,150	1,3	3,25	400	1	2,0	1,2
0,200	0,8	5,78	610	1	3,5	2,2
0,250	0,5	9,12	1000	1	5,5	3,5

Valorile obținute pe cale experimentală (Tabelul 7) au fost conforme cu cele obținute pe cale analitică, valoarea deplasării fiind corespunzătoare (4-5%). De asemenea, forța de revenire măsurată s-a situat în limitele calculate.

Singurul inconvenient a survenit datorită necesității unei lungimi relativ mari a firului pentru a putea obține și o deplasare suficient a actuatorului, fiind necesară construirea unei întregi rețele de fire, ceea ce contravine necesității de miniaturizare a actuatorului.

3.1.2.2. Varianta constructivă cu un element de tip arc cu dublu sens de memorie

Drept pentru care s-a procedat la testarea arcurilor din Ni-Ti în vederea integrării acestora în actuator. Pentru prima variantă constructivă s-a luat în considerare un singur arc de compresiune cu dublu sens de memorie a formei (Figura 48).

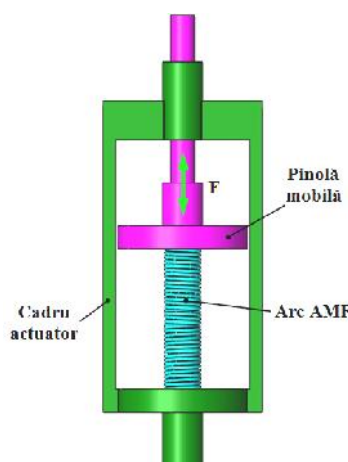


Figura 48. Varianta cu un singur arc (compresiune-tracțiune) cu dublu sens de memoria formei

Acest actuator utilizează arcul pentru a putea dezvolta o forță de împingere de 4,5 N și o deplasare de maxim 10 mm. Datorită formei de arc, viteza de efectuare a ciclurilor este mai redusă datorită eforturilor de forfecare transversal și de torsiune.

Firul din care s-a realizat arcul a fost un fir de aliaj Ni-Ti cu diametru de 2 mm. Tratamentul pentru educarea acestuia a constat într-o punere în soluție la temperatura de 650⁰ C cu o durată de timp de 60 minute, urmată de o revenire la 480⁰ C pentru 100 minute, urmată de o răcire lentă în aer liber. Inducerea memoriei s-a efectuat după cum urmează:

- după înfășurarea firului pe un suport cilindric, acesta a fost încălzit la 500⁰ C pentru 30 de minute, apoi răcit în aer liber;

- a urmat apoi o recoacere la $350 - 450^{\circ}\text{C}$ cu durata de 1 oră, timp în care firul a fost menținut pe suportul de formă cilindrică;
- ulterior, spirala a urmat un tratament termo-mecanic de-a lungul a câtorva cicluri la temperatura de 58°C (în stare martensitică) înainte de a elibera spirala de sub tensiunea de menținere pe suportul cilindric, iar în final a fost încălzită între $100 - 300^{\circ}\text{C}$, o temperatură ușor superioară temperaturii de finalizare a austenitei (A_f) (Figura 49).

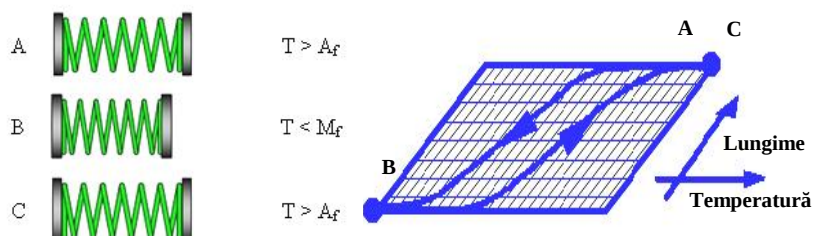


Figura 49. Funcționarea arcului cu dublu sens de memorie [90]

Se observă o schimbare spontană ce apare în timpul răcirii sub temperatura M_F (de A la B) (Figura 49). Această schimbare de formă este recuperată în timpul încălzirii următoare la o temperatură superioară A_F (B to C). Histerezisul întregii transformări este între $10 - 40\text{ K}$, în timp ce histerezisul de temperatură între A_F și M_F este de $20 - 60\text{ K}$.

Calculând eficiența maximă teoretică a acestui dispozitiv după modelul teoretic al ciclului Carnot, aceasta rezultă a fi de 10% . Spre deosebire de determinarea analitică, determinările experimentale au arătat de fapt că la acest tip de actuator, transformarea căldurii în lucru mecanic este mai puțin eficient, fiind doar de 3% .

Încălzit cu un curent de intensitate de 5 Amp , arcul a efectuat o cursă a actuatorului de $3,2\text{ mm}$ cu o forță de împingere de $4,8\text{ N}$. Diametrul arcului este de 10 mm , diametrul firului fiind de 2 mm . Temperatura de activare este de $55-65^{\circ}\text{C}$. Cu toate că s-a utilizat un curent de activare relativ mare, perioada de activare s-a dovedit a fi lungă ($5,4\text{ secunde}$), ceea ce conferă actuatorului calitatea de a fi unul lent, indiferent de metoda de răcire (liberă sau forțată).

Rezidă deci concluzia evidentă că este necesar a fi utilizate un număr mai mare de arcuri pentru a realiza performanțele propuse pentru actuator.

3.1.2.3. Varianta constructivă cu 4 elemente de tip arc cu simplu sens de memorie

Varianta constructivă elaborată în urma analizării variantelor premergătoare a fost concepută cu 4 elemente de tip arc, două din acestea fiind arcuri de tracțiune și două arcuri de compresiune.

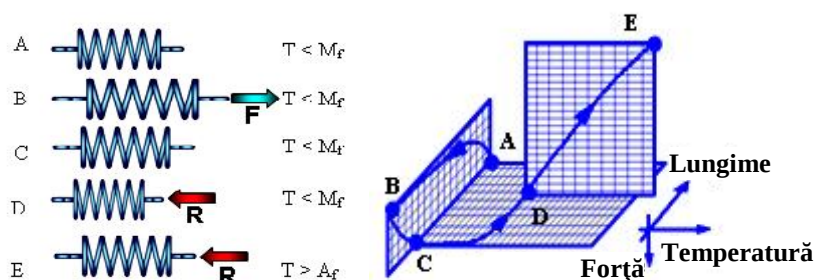


Figura 50. Principiul de funcționare al arcurilor de întindere din Nitinol [90]

În vederea integrării acestora în componența actuatorului, s-a procedat la dimensionarea acestora, conform celor prezentate în capitolul 3.1.1.

Arcul este deformat în timpul unei excursii de temperatură de la temperatura ambiantă (Figura 50) până la un punct inferior temperaturii M_F (A - B), urmat de o destindere (B - C), succedată din nou de o deformare, de data aceasta intervenind și forța de reacțiune R (C to D). Revenirea la forma memorată intervine ca o forță ce se opune forței R în urma încălzirii arcului la o temperatură inferioară punctului A_F (D - E), și astfel se realizează mișcarea necesară.

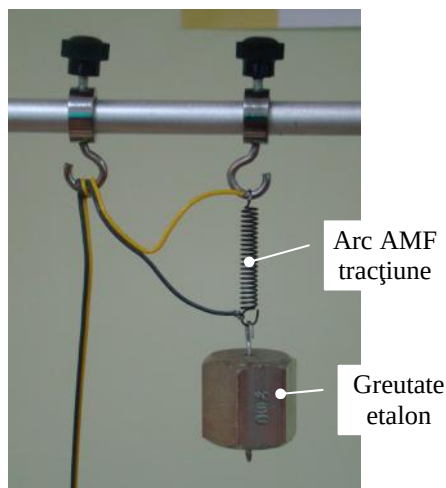


Figura 51. Testarea unui singur arc de tracțiune

Dimensiunile determinate analitic conform capitolului 3.1.1.3 pentru arcurile de tracțiune au reieșit ca fiind 0,750 mm pentru diametrul firului și 6 mm diametrul mediu al spirei, arcul fiind capabil să ridice o greutate de 450 grame. Arcul poate fi întins până la o lungime de 85 mm, iar la activare revine la o lungime de 17 mm.

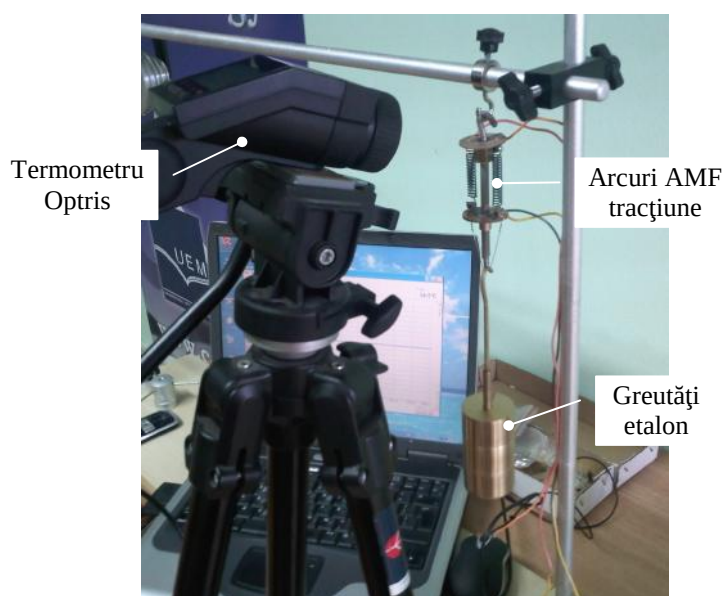


Figura 52. Testarea arcurilor de tracțiune (în paralel) cu sarcina de 700 grame

În Figura 51 este prezentată testarea unui singur arc cu o sarcină de 200 de grame, în timp ce Figura 52 prezintă testarea cu o greutate de 700 de grame a două arcuri grupate în paralel.

Curentul de activare de 2Amp a încălzit arcul, fenomenul de memorie a formei intervenind în intervalul de temperatură $45^{\circ} - 55^{\circ}\text{C}$.

Spre deosebire de arcurile de tracțiune, funcționarea arcurilor de compresie este reprezentată în Figura 52. Astfel, după comprimarea arcului, descrisă de parcursul (A - B), urmează o relaxare (B - C) prin încălzirea la o temperatură inferioară punctului de temperatură M_F . Tensiunea de deformare reziduală revine pentru parcursul C - D, datorită încălzirii la o temperatură inferioară punctului de temperatură A_F .

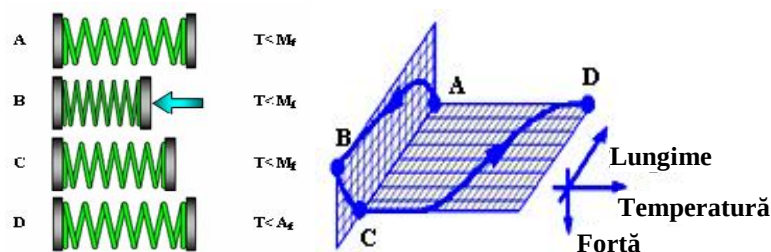


Figura 53. Generarea recuperării formei induse la arcurile de compresie [90]

Dimensiunile rezultate în urma efectuării calculului pentru dimensionarea arcurilor conform metodologiei dezvoltate în capitolul 3.1.1.4 sunt: diametrul firului $d = 0,950 \text{ mm}$, diametrul mediu al spirei $= 8 \text{ mm}$. Lungimea arcului la comprimare maximă este de $17,4 \text{ mm}$. Acestea se activează cu un curent electric de 3 Amp , temperatura de activare fiind $55^{\circ} - 65^{\circ}\text{C}$, dezvoltând o forță de $4,5\text{N}$.

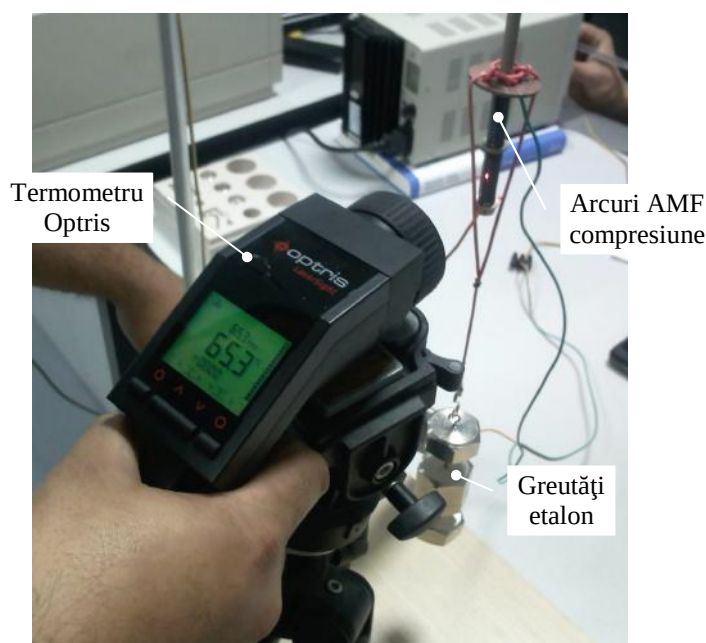


Figura 54. Testarea arcurilor de compresie (în serie) cu sarcina 900 grame

În urma testării experimentale a arcurilor, rezultatele centralizate fiind prezentate în tabelul 4, s-a procedat la integrarea acestora în actuator.

Tabel 8. Parametrii de lucru al celor două tipuri de arcuri testate

Parametru	Tracțiune	Compresie
Greutate nominală ridicată [gr]	350	450
Durata dinamică [sec]	4,5	5,5
Deplasare [mm]	30	35

Funcționarea întregului actuator s-a bazat pe funcționarea antagonistică a arcurilor de tracțiune cu arcurile de compresiune. În Figura 55 este prezentat principiul de funcționare a variantei constructive propuse.

Astfel, efectul de memorie a formei al arcurilor de compresiune, mai precis încălzirea acestora în vederea activării pentru revenirea la forma indusă este forța ce generează mișcarea ascendentă a discului suport 1 până în poziția A, fiind totodată și forța deformatoare pentru arcurile de tracțiune (Figura 55a).

Revenirea arcurilor de tracțiune la forma indusă inițial prin încălzirea acestora conduce la deplasarea discului suport 1 din poziția A până în poziția B (Figura 55b).

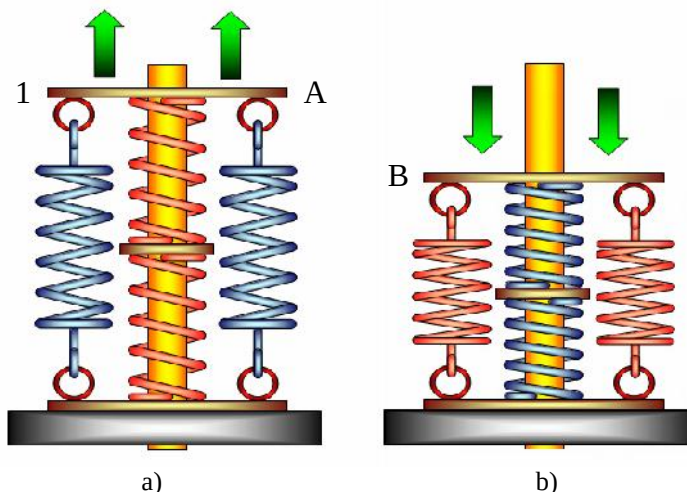


Figura 55. Principiul de funcționare al tipului de actuator propus

În mod similar, arcurile de compresiune sunt comprimate, asigurând în acest mod poziționarea pentru ciclul următor.

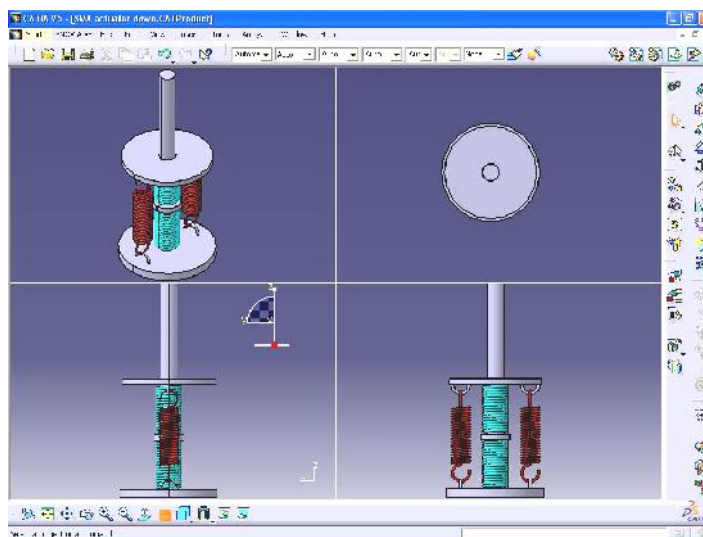


Figura 56. Poziția actuatorului cu arcurile de tracțiune activate (CATIA)

Simularea funcțională a actuatorului s-a efectuat inițial cu platforma software CATIA, versiunea 5.0, Figura 56 reprezentând actuatorul în poziția cu arcurile de tracțiune activate, iar Figura 57, actuatorul în poziția cu arcurile de compresiune activate.

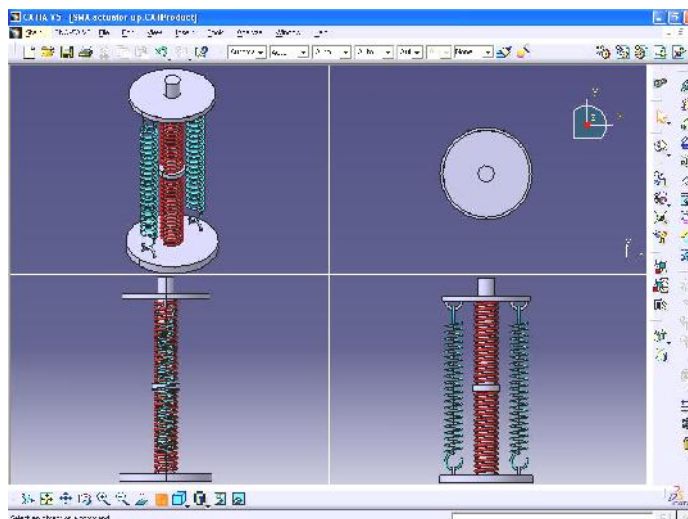


Figura 57. Poziția actuatorului cu arcurile de compresie activate (CATIA)

Ulterior, s-a procedat la verificarea funcționalității soluției constructive propuse și prin utilizarea platformei SolidWorks, platformă ce oferă respectiv realizarea geometrică a unui corp, asamblarea mai multor corpuri și generarea desenelor tehnice corespunzătoare corpurilor realizate.

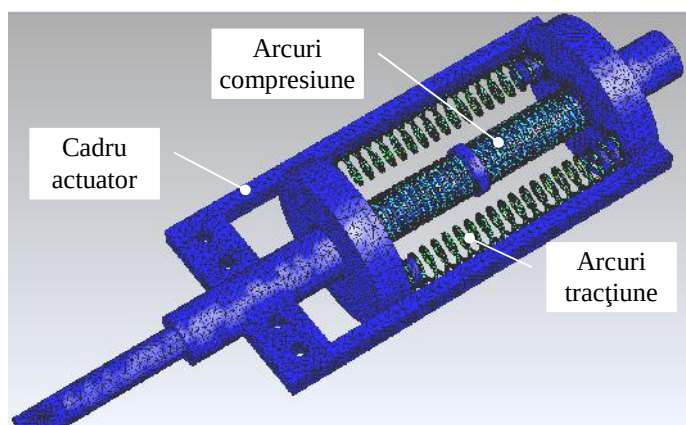


Figura 58. Ansamblu funcțional al variantei constructive cu 4 arcuri (2 compresie - 2 tracțiune)

Pentru efectuarea simulării, precedând realizarea geometrică a pieselor componente a variantei constructive de actuator propus și asamblarea acestora prin stabilirea poziției și interdependențelor dintre corpuri, pentru realizarea unui ansamblu (Figura 58), s-a procedat la discretizarea modelului realizat.

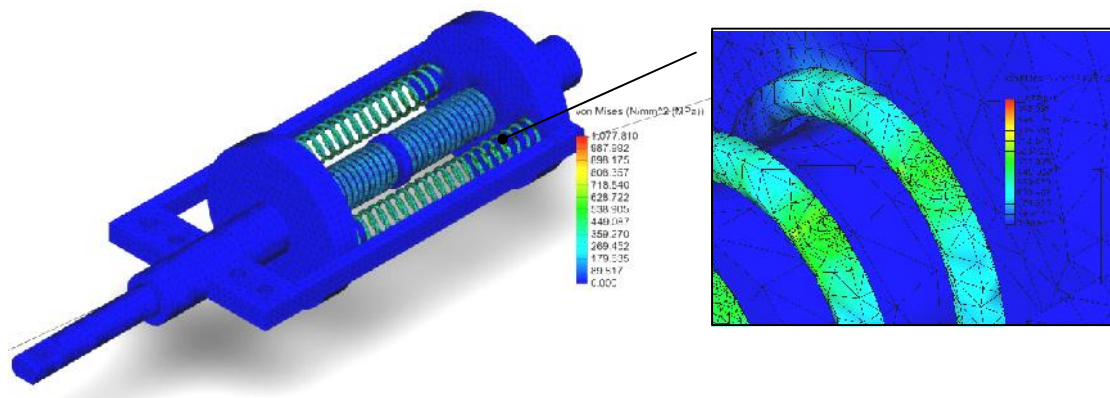


Figura 59. Tensiunile von Mises pentru varianta cu 4 arcuri

Discretizarea folosită a fost de tip Solid Mesh, discretizatorul folosit fiind de tipul Curvature based mesh, cu 4 puncte Jacobiene, mărimea maximă a unui element fiind de 133,67 μm , obținându-se o rețea din 22741 de noduri și 78167 de elemente, raportul complet regăsindu-se în Anexa 1 a tezei.

În urma discretizării, s-a putut trece la simularea animată a mișcărilor, a mișcării de bază și al studiului mișcării. Se poate observa în Figura 59 că în urma analizei, valorile maxime ale tensiunilor von Mises, conform hărții de culori, se regăsesc la nivelul arcurilor, situându-se la jumătatea scalei (628 MPa).

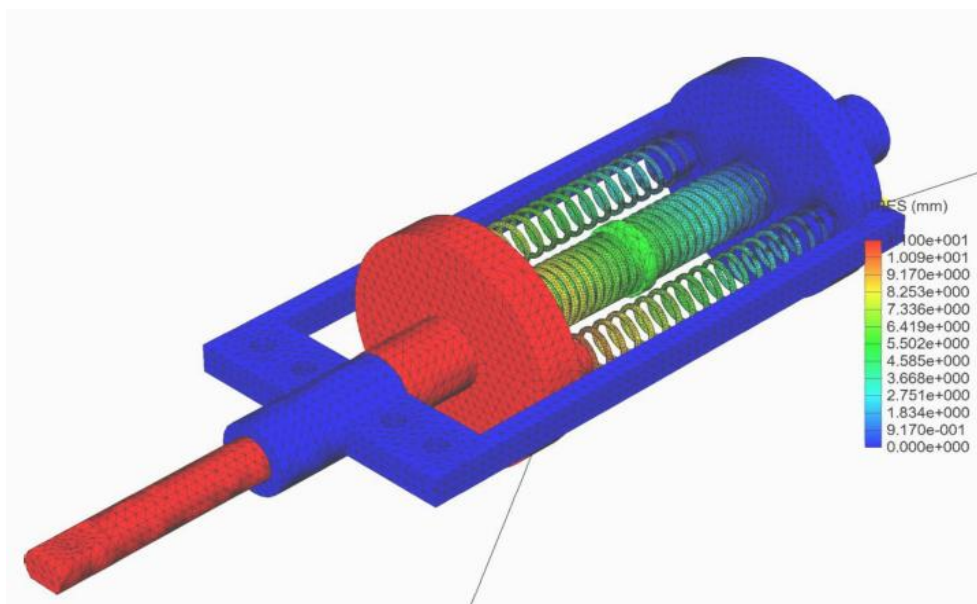


Figura 60. Deplasarea actuatorului ales ca variantă optimă

În urma simulării făcută pentru studiul mișcării (Motion Study) a reieșit că actuatorul poate efectua o cursă maximă de 35 de mm ca mișcare liberă, prezentată în Figura 60.

Ca o ultimă variantă s-a considerat introducerea unui arc suplimentar de tracțiune (Figura 62) în vederea îmbunătățirii duratei de revenire a actuatorului. Rezultatele experimentale însă au dovedit că soluția aleasă nu conferă rezultatele scontate, durata de revenire fiind redusă doar cu 0,5 secunde, raportul complet al simulării funcționării actuatorului fiind în Anexa 2 a prezentei teze.

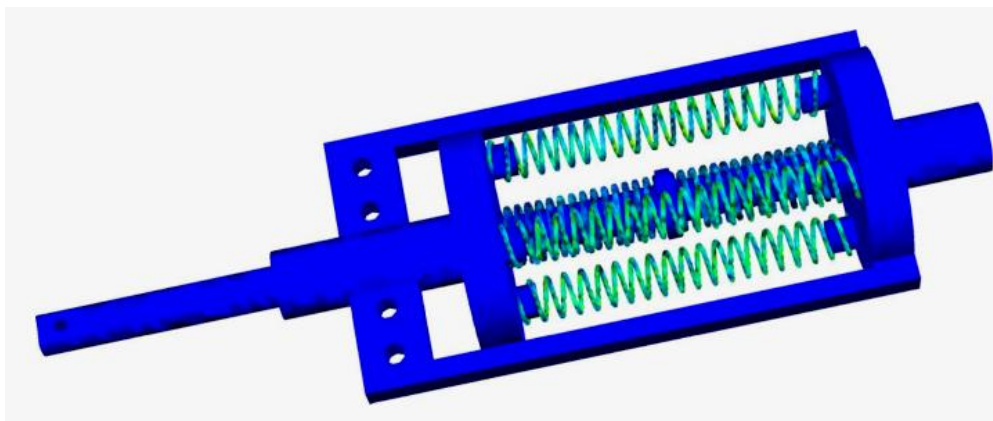


Figura 61. Varianta cu 5 arcuri (2 compresiune - 3 tracțiune) cu simplu sens de memoria formei

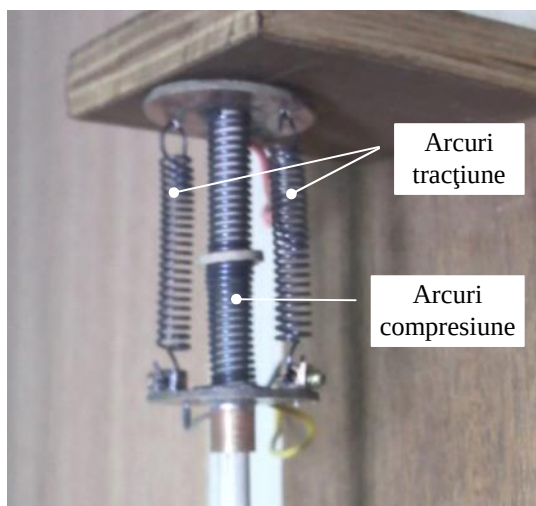


Figura 62. Prima versiune a actuatorului cu arcuri din AMF

A rezultat totodată că varianta cu 2 arcuri de compresie și două arcuri de tracțiune din Ni-Ti (Figura 62) este soluția cea mai echilibrată și cea mai eficientă dintre soluțiile constructive propuse și testate.

3.2. Concluzii și contribuții personale

În acest capitol s-au descris modurile de funcționare al diferitelor forme geometrice ale elementelor din AMF, punându-se accent pe aspectele de detaliu care definesc fiecare variantă constructivă propusă în parte. Abordările sunt analizate din punct de vedere calitativ, evidențiindu-se prin aspectele analitice și fenomenologice, particularitățile relevante care trebuiesc considerate în diferite etape de calcul.

Analiza comparativă realizată între diferitele forme geometrice ale elementelor din AMF pune în evidență particularitățile acestora, similitudinile și diferențele dintre acestea.

Prin abordarea tipurilor diferite elemente active considerate sub aspectul implementării acestora, au fost dobândite cunoștințe importante sub aspect constructiv și funcțional, care s-au dovedit foarte utile în abordarea noilor variante de actuatori propuse.

Valorile parametrilor cinetostatici funcționali ai elementelor active au fost determinate analitic și experimental, în timp ce aceeași parametri ai actuatorului propus s-au realizat prin simulare, rezultatele fiind validate prin determinări experimentale multiple, rezultând valori ale forței și deplasării realizate de elementele active din AMF, și implicit de actuator.

Folosind un senzor de deplasare cu laser, au fost determinate caracteristicile de deplasare ale elementelor active, iar prin utilizarea unui termometru cu infraroșu s-a realizat monitorizarea permanentă a temperaturii în vederea menținerii sub punctul de temperatură A_F , acest parametru fiind crucial pentru durata de viață a elementelor active din AMF. Încercările experimentale au fost efectuate pe două sau trei elemente, după caz, urmărindu-se constanța rezultatelor înregistrate la repetabilitate.

S-a observat faptul că efectul de memoria formei cu dublu sens nu reprezintă o soluție pentru eficiență maximă pentru atingerea obiectivelor propuse în ceea ce privește funcționalitatea actuatorului, soluția propusă cu utilizarea a mai multor arcuri cu efect de memorie cu un singur sens fiind net superioară.

Varianta constructivă cu două arcuri de tracțiune și două arcuri de compresiune a avut randamentul cel mai ridicat dintre toate soluțiile propuse, ajungând în final soluția aleasă pentru implementarea în componența dispozitivului de prehensiune.

Un alt parametru foarte important în proiectarea diferitelor tipuri de actuatori cu elemente active din AMF este și durata de timp scursă din momentul atingerii temperaturii optime de funcționare și atingerea limitei de deformare maximă.

Trebuie menționat faptul că în vederea aplicării tehnologiilor AMF, este foarte important de cunoscut modul și timpul în care elementele ajung la temperaturile de funcționare.

Contribuții personale

Contribuțiile autorului în acest capitol constau în considerarea diferitelor tipuri de analogii care pot fi făcute între modele diferite de actuatori cu elemente active din aliaje cu memoria formei. Totodată, au fost sintetizate și analizate variante geometrice de elemente active (fir, platabandă și arc), împreună cu posibilitățile de implementare ale acestora în componența variantelor de actuatori propuși.

A fost evidențiat caracterul structural și funcțional distinct și novativ al actuatorului propus spre realizare în această lucrare.

Pentru dimensionarea elementelor de tip arc din AMF s-a realizat și implementat o metodologie software de calcul pentru ușurința calculelor.

S-au proiectat și realizat modelele virtuale ale variantelor de actuatori concepuți.

S-a construit modelul fizic în vederea validării modelului virtual, precum și o metodă analitică proprie de experimentare funcție de necesitățile experimentale, conformă cu dotările disponibile și s-a efectuat simularea numerică a variantelor de actuator propuse, fiind făcută apoi validarea experimentală a rezultatelor obținute analitic și prin simulare.

Varianta optimă de actuator în vederea integrării acestuia în componența DP a fost stabilită ca fiind varianta cu două arcuri de tracțiune în paralel și două arcuri de compresiune înseriate.

Au fost avute în vedere toate cerințele care se impun unei activități cercetare experimentală științifică.

Datele obținute ca urmare a testelor efectuate s-au centralizat, analizat și prezentat sub formă tabelară și grafică.

4. CAPITOLUL IV. MODELAREA MATEMATICĂ ȘI SIMULAREA PREHENSIVII MECANICE CU UN DISPOZITIV DE PREHENSIVIE ACȚIONAT DE UN ACTUATOR CU ELEMENTE ACTIVE DIN AMF

4.1. Modelarea matematică a efectului de memoria formei

În ultimii ani, sistemele de calcul au cunoscut o asemenea dezvoltare încât modul de lucru a fost necesar a fi reconsiderat în numeroase domenii de activitate. Este inclusă aici și proiectarea inginerescă, planșeta de desen intrând în categoria obiectelor de muzeu.

S-a constatat o evoluție uimitoare atât în aria hardware, a componentelor fizice ale sistemelor de calcul, cât și în cea software, a componentelor logice. Au fost depășite o serie de bariere care acum un deceniu păreau de netrecut. Inginerul mileniului trei nu se mai poate rezuma la doar cunoștințele "clasice". Este necesar ca el să posede informații și despre sistemele de calcul.

Modelarea geometrică (grafică) permite abstractizarea sau reprezentarea obiectelor, înlocuind prototipurile utilizate de obicei în practică.

Modelarea funcțională (analitică) a sistemelor mecanice, a apărut odată cu primii pași ai dezvoltării științei; nu se vorbea încă de operația de modelare, conceptul și denumirea apărând mai târziu. Newton a realizat un pas important prin descoperirea relației $F = m \cdot a$, relație care genera ecuațiile diferențiale de mișcare ale unui punct material. Pe baza acestei relații clasice, metodele de modelare au cunoscut o continuă dezvoltare.

În Robotică, modelarea și simularea pe calculator au devenit necesare deoarece în etapa de concepție nu se poate proiecta robotul fără a cunoaște modelul matematic pe care acesta să fie încercat. Concepția robotului sau a sistemului robotizat necesită modelarea din ambele puncte de vedere, geometric și funcțional. Programarea of-line se realizează pe baza modelului geometric, iar mișcările acestuia sunt simulate pe baza modelului funcțional. Se poate spune că prin simulare se realizează funcționarea modelului pe calculator.

Se utilizează și următoarea terminologie: modelul de ordinul 0 al robotului reprezintă modelul geometric (deplasări), modelul de ordinul I reprezentând modelul cinematic.

În întreprinderi, tendința este de a integra toate activitățile prin intermediul calculatorului, inclusiv proiectarea constructivă și tehnologică. Modul de abordare al unor aplicații de specialitate este accesibil, fiind extinsă aria potențialilor utilizatori.

Mintea iscoditoare a omului a căutat întotdeauna căi noi și soluții eficiente ale problemelor apărute în fața sa. În căutarea celor mai bune mijloace de cercetare și de cunoaștere a legilor, caracteristice pentru obiectele și procesele complicate, omul a elaborat metoda modelării. Esența acestei metode, care a devenit una dintre cele mai puternice unelte de dezvoltare a științei și producției, constă în înlocuirea obiectului sau a procesului real care ne interesează cu un alt obiect sau proces, mai comod pentru studiere, cercetare sau conducere. După o astfel de înlocuire, nu se mai analizează obiectul primar ci modelul, iar rezultatele cercetărilor se extind asupra obiectului primar (desigur, cu anumite precauții).

Astfel, este clar că obiectul - model trebuie să reflecte și să repete într-o anumită măsură proprietățile și particularitățile obiectului primar, cel puțin acele proprietăți și particularități care sunt direct legate de cercetarea propusă. De aceea, la modelarea obiectelor și proceselor s-au folosit și se folosesc legile de similitudine, deduse în cursul istoriei de multe secole a practicii umane. Literalmente, modelele ne înconjoară, ele se creează și se utilizează la fiecare pas, ele ne servesc zilnic. Există însă și alte modele, care nu repetă într-o formă modificată obiectul modelat, dar care reflectă proprietățile și conținutul său numai în gând, în conștiința omului. Aceste modele abstracte sunt create pe baza informației. Folosirea acestor modele, obținerea rezultatelor modelării, precum și însăși aceste rezultate sunt foarte originale. De asemenea, tot așa de originale sunt și modelele care reprezintă aceleași obiecte și fenomene ale lumii materiale transferate însă în creier și transformate de acesta. Aceste modele, al căror purtător este creierul omului, sunt folosite de om în mod permanent.

Prin folosirea modelului în combinație cu măsurările cantitative și cu datele care caracterizează starea curentă a obiectului și a mediului modelat, se obțin rezultate foarte bune, chiar în condiții foarte complicate.

Dezvoltarea sistemelor automate precum și integrarea roboților industriali în cadrul proceselor de fabricație au dus la creșterea productivității muncii și calității produselor. Roboții industriali au schimbat procesele de producție așa cum calculatoarele au schimbat munca de birou. Uzina viitorului presupune celule și sisteme flexibile de fabricație conduse de calculatoare, mașini-unelte programabile și roboți industriali rigizi și mobili ce pot realiza autonom și cu precizie diverse sarcini de producție. Una din caracteristicile principale ce se cer unui robot autonom este existența capacității lui de învățare și procesare a informațiilor din mediul în care operează. Asupra capacității unui robot (a sistemului lui de conducere) de a procesa informații s-au făcut și se fac studii și cercetări diverse plecând de la tot atâtea teorii.

Structura de conducere a unui robot este în general o structură ierarhică. Acest principiu de conducere este datorat complexității deosebite a sistemelor ce intră în componența robotului și a dificultăților create de sarcinile de operare impuse. Un robot, indiferent de destinația sa, trebuie să execute o mișcare bine determinată în cadrul căreia elementul terminal evoluează pe o curbă impusă (traietorie) într-un sistem de referință dat. Determinarea traiectoriei mișcării, deci determinarea succesiunii în timp a pozițiilor, vitezelor și accelerațiilor pentru fiecare element al structurii mecanice constituie așa-numita "problemă directă de conducere".

O a doua problemă ce derivă din problema directă se referă la determinarea valorilor forțelor și momentelor, pe fiecare articulație, astfel încât structura mecanică să realizeze traiectoria dorită. Acest calcul al forțelor și momentelor din coordonatele pozițiilor și vitezelor constituie "problema inversă de conducere" și reprezintă sarcina de bază pentru sistemul de conducere al roboților. Condițiile reale în care operează un robot fac ca urmărirea unei traiectorii dorite să nu fie realizată cu asigurarea unor performanțe dorite. Cauzele sunt multiple și ele rezidă în principal din: perturbații imprevizibile în mediul de operare, imprecizia modelelor utilizate, limitări ale preciziei de calcul, efecte mecanice de vibrații și frecare etc.

Prin **simulare numerică** se înțelege efectuarea unei simulări cu ajutorul unui computer, mai exact cu ajutorul unui program. Acest program descrie, respectiv definește modelul de simulare. Din categoria primelor simulări cu ajutorul computerului face parte experimentul Fermi - Pasta - Ulam [52].

Simularea numerică sau digitală, utilizează modelarea și analiza computerizată pentru a verifica comportarea în timp a produselor supuse solicitărilor la diferite condiții de funcționare. Simularea și analiza numerică, folosind un prototip virtual, studiază aspectele descrise mai sus, eliminând sau reducând posibilitatea de apariție a defectelor cauzate de solicitările care apar în funcționare [29].

În ultimi ani, o dată cu dezvoltarea aplicațiilor software ingineresti pentru proiectarea și modelarea 3D a produselor, este posibilă optimizarea și dezvoltarea de produse folosind prototipul virtual. Etapele ulterioare concepției vor utiliza pentru simularea comportării și fabricației prototipul virtual. Principalele avantaje ale simulării numerice ale dispozitivelor sunt:

- prin simularea numerică a prototipului virtual, se reduc costurile cu testarea fizică;
- intervalul de timp în care se dezvoltă un produs nou, de la concepție până la fabricație, se reduce;
- este posibilă optimizarea produsului încă din faza de proiect, eliminând astfel costurile cu prototipurile fizice;
- calitatea, siguranța în funcționare și fiabilitatea cresc.

Proiectarea pieselor în construcția de mașini se realizează, în majoritatea cazurilor, fără utilizarea programelor specializate de proiectare asistată de calculator, respectiv de analiză a comportării acestora din punct de vedere al rezistenței mecanice. Metoda de analiză cu element finit permite vizualizarea spațială a comportării unor piese supuse la solicitări și oferă inginerilor posibilitatea de optimizare a pieselor pe baza criteriilor impuse prin proiectare. Utilizarea metodelor moderne de proiectare asistată de calculator și analiza comportării piesei la solicitării impuse prin metoda elementului finit, pune în mâna inginerului instrumentul necesar de lucru pentru optimizarea proiectării, cu efecte puternic pozitive referitoare la cunoașterea răspunsului piesei la solicitările impuse și a deformației pieselor, reducerea greutateii, detectare zonelor critice. Acest fapt contribuie la creșterea încrederii inginerilor în soluția rezultată și permite luarea unor decizii de proiectare în cunoștință de cauză.

O astfel de analiză implică, însă, asimilarea modului de lucru cu un program specializat de proiectare asistată, precum și a programelor de simulare și analiză cu element finit. Fără a neglija ușurința în manipularea acestor programe, specializarea în operarea cu astfel de programe se poate face numai printr-o investiție intelectuală, ceea ce impune asimilarea acestor metode de proiectare, simulare și analiză.

4.1.1. Modelul matematic

Soluția actuatorilor robotici cu elemente active din AMF aduce o soluție inovativă nu doar din punct de vedere economic (eficiență energetică, reducerea costurilor) dar în același timp o soluție durabilă din punct de vedere ecologic. Acest fapt a stat la baza necesității unei mai bune înțelegeri a comportării termo-mecanice a aliajelor cu memoria formei și cum se poate exploata mai această comportare pentru proiectarea actuatorilor. Din acest fapt rezidă în mod imperios dezvoltarea unui model matematic capabil să descrie toate proprietățile termo-mecanice a AMF printr-un set de o complexitate cât mai redusă de ecuații constitutive.

După cum s-a menționat anterior, efectul de memoria formei poate fi observat la un număr limitat de aliaje metalice, fiind caracterizat prin recuperarea unei forme inițiale induse în urma

încălzirii până la un prag de temperatură, după o deformare relativ mare a elementului din aliajul respectiv. Spre deosebire de super-elasticitate, o proprietate care nu necesită încălzirea elementului pentru a-și recăpăta forma indusă inițial, atât pentru efectul simplu cât și pentru cel dublu de memoria formei este necesară încălzirea elementelor pentru revenirea acestora la forma geometrică indusă inițial. Această proprietate se manifestă în cazul în care temperatura ambiantă nu depășește valoarea pragului de austenitizare A_f . Prin aplicarea unei sarcini la o temperatură constantă inferioară pragului temperaturii de austenitizare, materialul prezintă o comportare neliniară. După înlăturarea sarcinii, materialul își va recăpăta forma inițială fără a fi necesară nici un fel de intervenție termică. Trebuie menționat însă faptul că traiectoria în cazul aplicării sarcinii nu este aceeași cu cea de relaxare, bucla rezultată astfel în diagrama sarcină-deplasare fiind denumit histerezis (Figura 63).

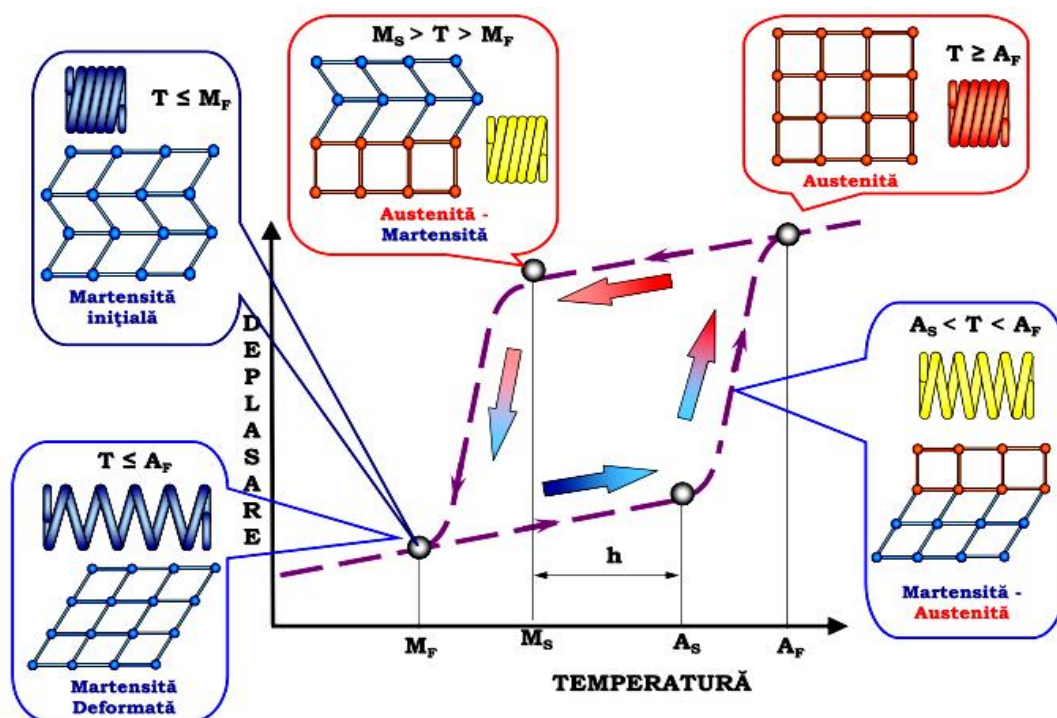


Figura 63. Principiul de funcționare al elementelor active funcție de temperatura de încălzire

Diferența esențială între efectul simplu de memoria formei și cel dublu de memoria formei constă în faptul că în urma răcirii, în cazul efectului simplu nu apare nici un fel de modificare a formei geometrice a elementului indiferent de cât de scăzută e temperatura de răcire. Spre deosebire de aceasta, în cazul efectului dublu de memoria formei, scăderea sub un anumit prag de temperatura conduce de asemenea la schimbarea formei geometrice a elementului din AMF, deci transformările de fază martensită - austenită și invers apar atât la faza „caldă” cât și în cazul fazei „reci”.

Drept pentru care, pentru aplicațiile practice cu elemente termo-sensibile, este necesar să se poată defini cantitativ performanțele comportamentale ale elementelor. Faptul că până în prezent majoritatea conceptelor dezvoltate au fost efectuate pe bază experimentală denotă absența unui instrument necesar simulării funcționale ale AMF.

În cazul în care se ia în considerare deplasarea ca fiind unidirecțională, funcționarea materialului comportă mici diferențe a energiei libere în timpul transformărilor de fază între faza austenitică (rețea cubică) și cele două tipuri de faze martensitice (inițială și deformată). Aceste

schimbări de fază pot surveni în urma unor sarcini mecanice, termice sau a amândorura, și constituie caracteristica principală a ceea ce denumim „efectul de memoria formei” (Figura 64).

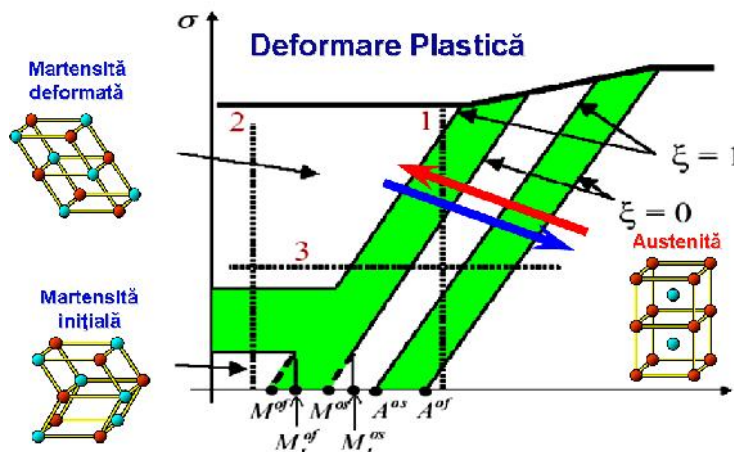


Figura 64. Diagrama Deformare – Temperatură

Există două faze caracteristice în care se regăsește materialul, numite cvasi-plastică și pseudo-elastică. Interacțiunea dintre aceste două faze este tocmai efectul de memorie, fapt ce conferă elementului din AMF capacitatea de deplasare.

Pornind de la modelul matematic elaborat de Dimitris Lagoudas [60] și pe baza analizelor efectuate anterior a rezultat că substructura Ni- din compoziția aliajului Ni-Ti are o comportare elasto-plastică, în timp ce substructura Ti- prezintă o comportare elastică. Aceste condiții sunt exprimate de ecuațiile constitutive prin relațiile 4.3 a, 4.5 a, 4.6 a și 4.8 a considerate pentru cele două substructuri. Aceste ecuații constitutive exprimă interdependențele dintre micro-tensiuni, micro-deformări în substructura Ti- (index t), micro-deformări în substructura Ni- (index n) și macro-deformări (marcate cu bară).

Fracțiunile de volum a constituenților Ni- și Ti- s-au introdus și s-au notat ca fiind v_n, v_t , respectiv $(v_n = 1 - v_t)$. Se presupune validitatea următoarelor ecuații [61]:

$$v_n \sigma_{ijn} + v_t \sigma_{ijt} = \bar{\sigma}_{ij}, \quad 4.1$$

$$v_n \varepsilon_{ijn} + v_t \varepsilon_{ijt} = \bar{\varepsilon}_{ij}, \quad 4.2$$

în care $\varepsilon_{ijn}, \varepsilon_{ijt}$ sunt tensorii de deformare asociați microstructurilor Ni- și Ti-, respectiv $\pm_{ijn}, \pm_{ijt}$ sunt tensorii de tensiune asociați microstructurilor Ni- și Ti-, iar $\bar{\varepsilon}_{ij}$ și $\bar{\sigma}_{ij}$ sunt tensorii tensiunii și deformației macroscopice.

Setul de ecuații constitutive proiectat pentru un aliaj constituit din două materiale a fost adaptat pentru aliajele cu memorie după cum urmează [10]:

$$de_{ijn} = \mu ds_{ijn} + s_{ijn} d\lambda_n, \quad \varepsilon_n = \rho \sigma_n = \rho \bar{\sigma} = \bar{\varepsilon}, \quad 4.3$$

$$de'_{ijn} = de_{ijn} - d\bar{\varepsilon}_{ij}, \quad \varepsilon'_n = \varepsilon_n - \bar{\varepsilon}, \quad 4.4$$

$$de'_{ijn} = \mu ds'_{ijn} + s'_{ijn} d\lambda_n, \quad \varepsilon'_n = 0, \quad 4.5$$

$$de_{ijt} = \mu ds_{ijt}, \quad \varepsilon_t = \rho \sigma_t = \rho \bar{\sigma} = \bar{\varepsilon}, \quad 4.6$$

$$de'_{ijt} = de_{ijt} - d\bar{\varepsilon}_{ij}, \quad \varepsilon'_t = \varepsilon_t - \bar{\varepsilon}, \quad 4.7$$

$$de'_{ijt} = \mu ds'_{ijt}, \quad \varepsilon'_t = 0, \quad 4.8$$

unde e_{ijn}/s_{ijn} reprezintă abaterile mediei tensorilor de deformare și tensiune $\varepsilon_{ijn}/\pm_{ijn}$ într-un material pentru constituentul Ni-, e_{ijt}/s_{ijt} reprezintă abaterile mediei tensorilor de deformare și tensiune $\varepsilon_{ijt}/\pm_{ijt}$ pentru constituentul Ti-, $\phi_{ij}\varepsilon_n/\phi_{ij}\pm_n$ sunt părțile izotropice a mediei tensorilor de deformare și tensiune $\varepsilon_{ijn}/\pm_{ijn}$ pentru constituentul Ni-, $\phi_{ij}\varepsilon_t/\phi_{ij}\pm_t$ sunt părțile izotropice a mediei tensorilor de deformare și tensiune $\varepsilon_{ijt}/\pm_{ijt}$ pentru constituentul Ti-. Valorile macroscopice ale tensorilor sunt marcate cu bară. Simbolurile $\llbracket = (1+\nu)/E \rrbracket$ și $\circ \llbracket = (1-2\nu)/E \rrbracket$ reprezintă capacitățile elastice ale materialului, respectiv ν coeficientul lui Poisson și E modulul de elasticitate a lui Young. Simbolurile marcate cu prim ' definite de ecuațiile 4.4 și 4.7, caracterizează influența neomogenității câmpurilor de deformare și tensiune. Parametrul λ_n reprezintă mărimea scalară a deformației neelastice din constituentul Ni-. Ecuațiile 4.6 a și 4.8 a exprimă caracterul elastic al substructurii Ti-, în timp ce ecuațiile 4.3 a și 4.5 a descriu comportamentul elasto-plastic al substructurii Ni-, considerând ca valid criteriul von Misses pentru această substructură.

Ecuațiile 4.1 și 4.2 sunt valide de asemenea și pentru abaterile mediei tensorilor de deformare și tensiune:

$$v_n s_{ijn} + v_t s_{ijt} = \bar{s}_{ij}, \quad 4.9$$

$$v_n e_{ijn} + v_t e_{ijt} = \bar{e}_{ij}, \quad 4.10$$

Astfel, avem un număr de nouă diferențiale tensoriale necunoscute: $ds_n, ds_t, de_n, de_t, d\bar{e}, ds'_n, ds'_t, de'_n$ și de'_t . Pentru determinarea acestora sunt disponibile însă doar 8 ecuații, și anume: 4.3 - 4.8, 4.9 și 4.10. Rezultă necesitatea adăugării unei noi ecuații în vederea rezolvării sistemului constituit anterior. Această nouă ecuație derivă din condiția prin care se consideră doar încărcarea mecanică (relația 4.11), și are forma:

$$(s_{ijn})_M - (s_{ijt})_M + \frac{s'_{ijn}}{\eta_n} - \frac{s'_{ijt}}{\eta_t} = 0, \quad 4.11$$

unde η_n, η_t sunt așa numiții parametri structurali. Acești parametri structurali se presupun a fi constanți pentru procesele fără difuziune, în care vecinătățile atomice rămân neschimbate, cum este în cazul transformării martensită-austenită, și se determină pe baza graficului tensiune-deplasare calculat prin metode analitice și determinat experimental. Indicele $_M$ relevă faptul că s-a luat în considerare doar încărcarea mecanică. Expresia efortului total însumează solicitările datorate încărcării mecanice și cele datorate schimbării temperaturii aliajului, expresia fiind reprezentată de ecuația:

$$\sigma_{ijn} = (\sigma_{ijn})_M + (\sigma_{ijn})_T, \sigma_{ijt} = (\sigma_{ijt})_M + (\sigma_{ijt})_T, \quad 4.12$$

unde $(\pm_{ijt})_M$ este tensorul tensiune datorată încărcării mecanice iar $(\pm_{ijt})_T$ tensorul tensiune datorată schimbării temperaturii. În această abordare s-a considerat că efectul schimbării de temperatură este în strânsă corelație cu diferențele datorate expansiunii termice a celor două elemente din aliajul binar, respectiv Ni și Ti.

Schimbările de temperatură și dilatățile datorate expansiunii termice a celor două substructuri se regăsesc în tensiuni ce se auto-echilibrează, fiind exprimate matematic în relația:

$$\sigma_{ijn} = (\sigma_{ijn})_M + (\sigma_{ijn})_T, \sigma_{ijt} = (\sigma_{ijt})_M + (\sigma_{ijt})_T, \quad 4.13$$

Ecuatiile 4.14 și 4.15 sunt adevărate și pentru erorile tensorilor de tensiune:

$$s_{ijn} = (s_{ijn})_M + (s_{ijn})_T, s_{ijt} = (s_{ijt})_M + (s_{ijt})_T, \quad 4.14$$

$$v_n(s_{ijn})_T + v_t(s_{ijt})_T = 0, \quad 4.15$$

Pentru ca setul de ecuații să fie solvabil, este necesar să se exprime tensorii $(s_{ijn})_T$ și $(s_{ijt})_T$ caracteristici celor două substructuri prin intermediul altor mărimi tensoriale. Conform conceptului adoptat, efectul de memoria a formei apare în urma deformării neelastice a substructurii Ni-. Această deformarea neelastică este recuperată în timpul încălzirii, procesul fiind direct conectat cu schimbarea parametrului $(s_{ijn})_T$. Presupunând că $(s_{ijn})_T$ depinde de erorile deformației substructurii Ti-, acest fapt este cauzat de deformarea neelastică a substructurii Ni-. Se poate ușor observa că s'_{ijt} are proprietatea următoare: în domeniul elastic, în apropierea stării de echilibru, unde nu există tensiuni, valoarea este nulă, și nu se modifică datorită nici unei deformații elastice. Valoarea acestuia este modificată doar datorită apariției deformației inelastice a substructurii Ni-. Acest fapt reiese matematic din relațiile 4.8, 4.7 și 4.2, exprimat în relația:

$$[ds'_{ijt}]_{el} = \frac{1}{\mu} [de'_{ijt}]_{el} = \frac{1}{\mu} [de_{ijt}]_{el} - [d\bar{e}_{ij}]_{el} = 0, \quad 4.16$$

Obiectivul constă în găsirea unei relații care să exprime dependența dintre deformația de revenire și temperatură. Pentru introducerea efectului termic este convenient de a porni de la o temperatură specifică, inferioară punctului de începere a apariției austenitei A_s , care nu are influență asupra procesului de revenire. Această temperatură va fi notată cu T_0 , corespunzătoare stării martensitice. Una din premisele asumate este că starea materialului premergătoare efectului de memoria formei este integral martensitică. Excursia de temperatură funcție de T_0 este definită în relația:

$$\tau = T - T_0, \quad 4.17$$

Se presupune că $(s_{ijn})_T$ depinde de s'_{ijt} și τ^2 . Cea mai simplă exprimare a formulei ce implică toți parametri menționați este definită în relația:

$$(s_{ijn})_T = \omega \tau s'_{ijt}, \quad 4.18$$

sau exprimată sub formă diferențială:

$$(ds_{ijn})_T = \omega \tau ds'_{ijt} + \omega s'_{ijt} d\tau, \quad 4.19$$

unde μ reprezintă o constantă de proces. Datorită faptului că se presupune ca modelul definit să se refere la diferite procese de încălzire și răcire cu deformări atât elastice cât și inelastice, μ poate avea diferite valori.

Din setul de ecuații definite mai sus rezultă că ecuația constitutivă macroscopică (relația 4.20) împreună cu ecuațiile aferente ale evoluției variabilelor interne se derivă conform relațiilor:

$$d\bar{e}_{ij} = \mu d\bar{s}_{ij} + v_n s_{ijn} d\lambda_n, d\bar{e} = \rho d\bar{\sigma}, \quad 4.20$$

$$ds_{ijn} = d\bar{s}_{ij} - \frac{1}{P + R + \omega \tau R v_n / v_t} \{ [(v_t P + \omega \tau \eta_n \eta_t v_n) s_{ijn} - \eta_t s'_{ijn}] d\lambda_n / \mu - \omega \eta_n \eta_t s'_{ijt} d\tau \} \quad 4.21$$

$$ds'_{ijn} = ds_{ijn} - d\bar{s}_{ij} + (v_t s_{ijn} - s'_{ijn}) d\lambda_n / \mu, \quad 4.22$$

$$ds'_{ijt} = v_n \left(\frac{d\bar{s}_{ij} - ds_{ijn}}{v_t} - s_{ijn} \frac{d\lambda_n}{\mu} \right), \quad 4.23$$

unde

$$P = v_n \eta_n + v_t \eta_t, R = \eta_n \eta_t, \quad 4.24$$

sunt constante ce urmează a se determina.

$$d\hat{\lambda}_n = \mu \frac{(P + R + \omega \tau R v_n / v_t) s_{ijn} d\bar{s}_{ij} + R \omega \omega_{ijn} s'_{ijt} dt}{(v_t P + v_n R \omega \omega_{ijn}) s_{ijn} - v_t \eta_t s_{ijn} s'_{ijt}}, \quad 4.25$$

Relaționarea dintre $d\lambda_n$ și $d\hat{\lambda}_n$ este definită de ecuația 4.10. Parametrii structurali η_n, η_t , fracțiunile de volum a constituenților Ni și Ti v_n, v_t , comportările elastice ϵ și σ , limitele de elasticitate c_n și μ sunt parametri și constante ce se pot determina, fiind constante pentru aliajul cu memoria formei considerat, respectiv NiTi. Determinarea acestora reprezintă totuși o problemă suficient de complexă, și constă în potrivirea diagramei deplasare-tensiune calculată analitic și determinată experimental pentru aliajul considerat.

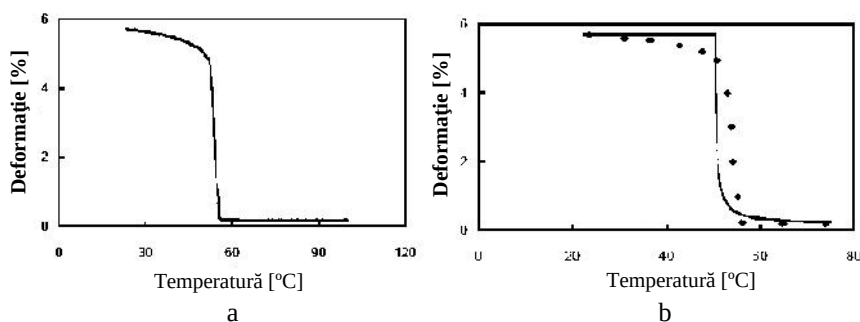


Figura 65. Diagrama deformație - temperatură
Sursa [12]

Figura 65 prezintă graficul curbei deplasării de revenire calculată pe baza setului de ecuații constitutive 4.20 - 4.25, în care parametrii $\eta_n, \eta_t, v_n, v_t, c_n, \epsilon, \sigma$ și μ au fost determinați. Figura 65a reprezintă diagrama deformație - temperatură a efectului de memoria formei pentru o temperatură sub punctul A_f , în timp ce Figura 65b prezintă cele două diagrame, cea calculată analitic și cea determinată experimental (linia continuă reprezintă determinarea analitică, punctele fiind valorile determinărilor experimentale) [10].

4.2. Modelarea prehensiunii mecanice

Dispozitivele de prehensiune mecanice realizează prehensiunea prin intermediul forțelor mecanice dezvoltate de sistemul mecanic. Prehensiunea mecanică poate fi analizată în două ipostaze, și anume: ca prehensiune statică și ca prehensiune dinamică.

În primul caz se stabilesc condițiile pentru ca ansamblul dispozitiv de prehensiune - obiect să ajungă și să rămână în echilibru static, deci să se comporte ca un ansamblu fix, iar în al doilea caz trebuie precizate condițiile ca obiectul prins de dispozitivul de prehensiune să poată fi mișcat față de degete (manipulat).

În general, sistemul mecanic de prehensiune sau dispozitivul de prehensiune este format din corpuri rigide și cuprinde:

- *structura mecanică* a actuatorului ce generează puterea mecanică de acționare
- *efectori*, care sunt subansamblul care transmite puterea mecanică de la actuator la elementele care realizează contactul cu obiectul manipulat;

- *obiectul* destinat manipulării;

În următoarele rânduri, dispozitivul de prehensiune va fi tratat în următoarele considerații:

- în afara elementelor de contact cu obiectul, toate celelalte elemente sunt considerate solide nedeformabile (rigide) legate prin cuple care neglijează frecarea;
- elementele ce contactează obiectul se vor trata ca elemente solide nedeformabile;
- contactul cu obiectul manipulat este tratat în situația neglijării frecării în situația considerării frecării;
- obiectul manipulat este considerat nedeformabil și element solid deformabil în partea de contactare.

4.2.1. Modelarea contactului mecanic

Dacă se consideră o forță reprezentată printr-un vector alunecător $\vec{F}_i$ și dacă notăm cu $\vec{M}_i$ momentul acestei forțe în raport cu un pol O, atunci tursorul în polul O al vectorului alunecător $\vec{F}_i$ este format din vectorul liber $\vec{F}_i$ și vectorul legat $\vec{M}_i$ (Figura 66). Acest tursor se va nota conform relației:

$${}^2_o(\vec{F}_i) = {}^2(\vec{F}_i) = \{\vec{F}_i, \vec{M}_i\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_i \\ \vec{M}_i \end{matrix} \right\} \quad 4.26$$

Pentru un câmp de vectori $X_1, X_2, \dots, X_q$, vectorul rezultat într-un punct este:

$$\vec{R}_A = \vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \dots + \vec{X}_q \quad 4.27$$

În același punct A, considerând punctele p_i originile vectorilor X_1 se obține un moment rezultat de forma:

$$\vec{M}_{(A)} = \vec{X}_1 \times \overrightarrow{p_1 A} + \vec{X}_2 \times \overrightarrow{p_2 A} + \dots + \vec{X}_q \times \overrightarrow{p_q A} \quad 4.28$$

În punctul A, tursorul corespunzător vectorilor $X_1, X_2, \dots, X_q$, este exprimat în relația:

$$\tau_A(\vec{R}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{R} \\ \vec{M}_{(A)} \end{matrix} \right\} \quad 4.29$$

Scrierea matricială a tursorului se face după cum urmează:

Considerând un sistem de referință triortogonal de axe x, y, z cu vectorii $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ și originea O, vectorul oarecare $\vec{V}_i$ se scrie conform relației:

$$\vec{V}_i = X_i \vec{i} + Y_i \vec{j} + Z_i \vec{k} \quad 4.30$$

Matricea asociată acestui vector se regăsește în relația:

$$\vec{V}_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_O \quad 4.31$$

în care X_i, Y_i, Z_i sunt proiecțiile vectorului pe axele sistemului de referință.

Momentul vectorului $\vec{V}_i$ în punctul O este:

$$\vec{M}_i = M_{ix}\vec{i} + M_{iy}\vec{j} + M_{iz}\vec{k} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_i & y_i & z_i \\ X_i & Y_i & Z_i \end{bmatrix}_O \quad 4.32$$

în care M_{ix} , M_{iy} și M_{iz} sunt componentele scalare după axele reperului $\{O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}\}$, iar x_i, y_i, z_i sunt componentele scalare ale vectorului de poziție după aceleași axe.

Matricea atașată vectorului moment este exprimată de relația:

$$\vec{M}_i = \begin{bmatrix} M_{ix} \\ M_{iy} \\ M_{iz} \end{bmatrix}_O = \begin{bmatrix} 0 & -z_i & y_i \\ z_i & 0 & -x_i \\ -y_i & x_i & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_O = \begin{bmatrix} y_i Z_i - z_i Y_i \\ z_i X_i - x_i Z_i \\ x_i Y_i - y_i X_i \end{bmatrix} \quad 4.33$$

Ca urmare, forma matricială a torsorului vectorului $\vec{V}_i$ față de punctul O este:

$$\vec{z}_O(\vec{V}_i) = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ M_{ix} \\ M_{iy} \\ M_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ y_i Z_i - z_i Y_i \\ z_i X_i - x_i Z_i \\ x_i Y_i - y_i X_i \end{bmatrix} \quad 4.34$$

4.2.2. Tipuri de contacte mecanice (obiect de manipulat - braț prehensor)

Cele trei tipuri de contacte mecanice considerate în vederea elaborării și stabilirii modelului matematic au fost contactul mecanic între două corpuri nedeformabile fără frecare, cu frecare și contactul mecanic între două corpuri solide deformabile cu frecare, prezentate în cele ce urmează.

4.2.2.1. Contact mecanic în ansamblul obiect de manipulat - efector (nedeformabile) fără frecare

Între două corpuri solide nedeformabile, respectiv obiectul de manipulat și brațul dispozitivului de prehensiune, în ipoteza neglijării frecării, considerând că formele corpurilor sunt oarecare și au un punct de contact, la acțiunea unui corp asupra celuilalt sunt generate două forțe egale și de sens contrar având ca suport normala comună la suprafețele în contact (Figura 66).

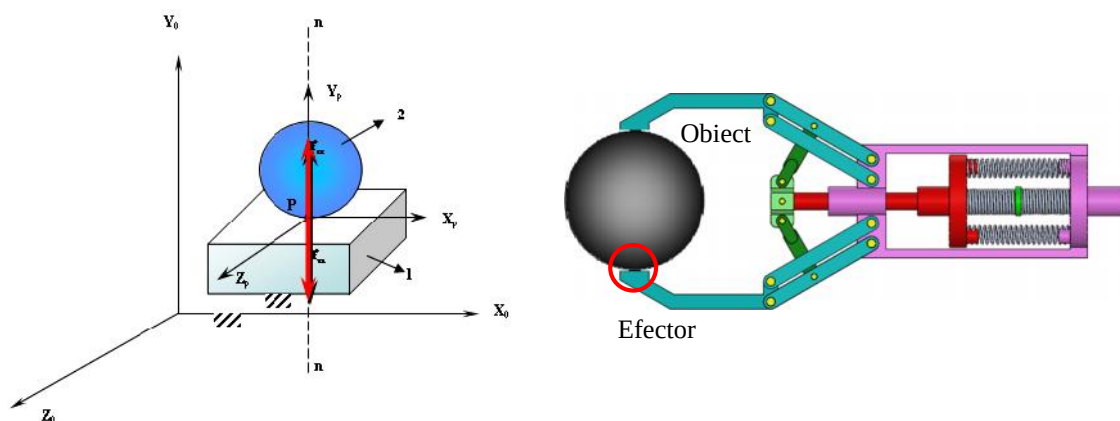


Figura 66. Contact mecanic între obiectul de manipulat și efectorul prehensorului (fără frecare)

Considerând vectorul forță care acționează asupra obiectului de manipulat, acesta generează un torsesor static în sistemul de referință cu originea în punctul P și un alt torsesor static în sistemul de referință, fixat de efector, cu originea în punctul O.

În scriere matriceală cei doi torsori sunt:

$$\tau_{SP}(\vec{F}_{12}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} \\ \vec{M}_P(\vec{F}_{12}) \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} \\ \vec{O} \end{matrix} \right\} \quad 4.35$$

$$\tau_{SO}(\vec{F}_{12}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} \\ \vec{M}_O(\vec{F}_{12}) \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} \\ \vec{M}_P(\vec{F}_{12}) \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \vec{O} \\ \vec{OP} \times \vec{F}_{12} \end{matrix} \right\} \quad 4.36$$

$$\vec{z}_{SP}(\vec{F}_{12}) = \begin{bmatrix} F_{12}x_p \\ F_{12}y_p \\ F_{12}z_p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tau_{SO}(\vec{F}_{12}) = [T_{PO}] \tau_{SP} \quad 4.37$$

în care $[T_{PO}]$ este matricea de trecere de la P la O.

4.2.2.2. Contact mecanic în ansamblul obiect de manipulat - efector (nedeformabile) cu frecare

În acest caz, în ipoteza acțiunii obiectului de manipulat într-un punct asupra efectorului dispozitivului de prehensiune și considerarea frecării, sunt generate : o forță de reacțiune asupra obiectului de manipulat, având ca suport normala comună la suprafețele celor două corpuri în punctul de contact și o forță de frecare perpendiculară pe prima și dispusă în plan tangent la suprafețele corpurilor în punctul de contact (Figura 67).

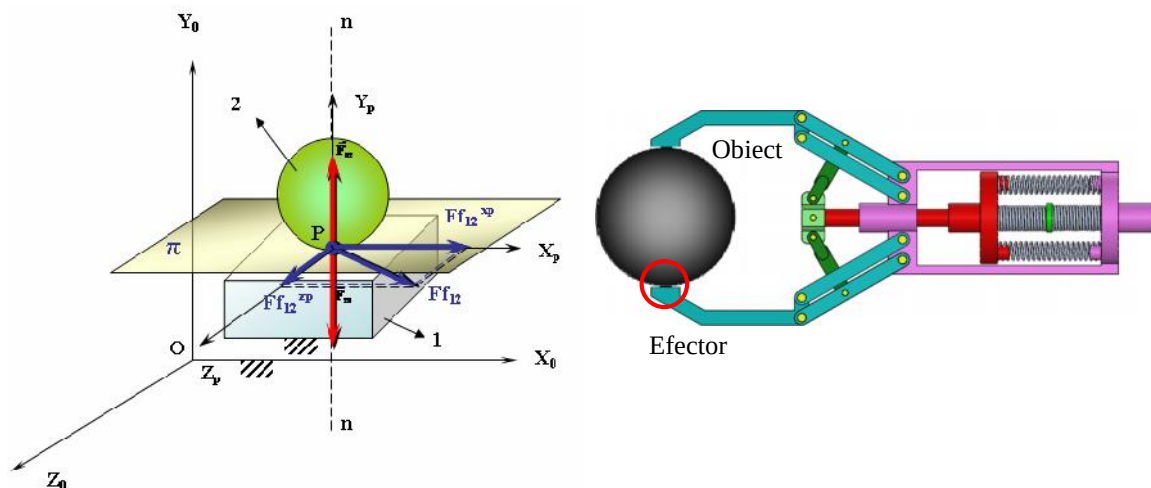


Figura 67. Contact mecanic între obiectul de manipulat și efectorul prehensorului (cu frecare)

Forța de frecare $\vec{F}_{12f} = \mu_{12} \vec{F}_{21}$, se poate descompune după două axe perpendiculare dispuse în planul tangent (μ_{12} reprezintă coeficientul de frecare între două corpuri).

În sistemul de referință cu originea în punctul de contact P rezultă un torses static (relația 4.38):

$${}^2_{SP}(\vec{F}_{12}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} + \vec{F}_{12f} \\ \vec{M}_P(\vec{F}_{12}) + \vec{M}_P(\vec{F}_{12f}) \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} + \vec{F}_{12f} \\ \vec{O} \end{matrix} \right\} \quad 4.38$$

Corespunzător, va rezulta un torses în punctul O al sistemului de referință atașat la brațul prehensorului:

$$\tau_{SO}(\vec{F}_{12}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{R}_{12} \\ \vec{M}_O(\vec{F}_{12}) \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} + \vec{F}_{12f} \\ \vec{M}_P(\vec{F}_{12}) + \vec{OP} \times (\vec{F}_{12} + \vec{F}_{12f}) \end{matrix} \right\} \quad 4.39$$

4.2.2.3. Contact mecanic în ansamblul obiect de manipulat (deformabil) - efector cu frecare

În cazul în care obiectul de prehensat este considerat ca un corp solid deformabil, punctul de contact este înlocuit cu o zonă de contact. La acțiunea obiectului manipulat asupra efectorului dispozitivului de prehensiune din Figura 68 sunt generate următoarele forțe: o forță de reacțiune $\vec{F}_{12}$ asupra obiectului manipulat ce are ca suport normala comună la suprafețele corpurilor în punctul teoretic de contact, o forță de frecare $\vec{F}_{12f} = \mu_{12} \vec{F}_{21}$ dispusă în planul tangent comun la suprafețele în contact și un moment de frecare $\vec{M}_{12f}$ care se opune tendinței mișcării de rotație în jurul normalei.

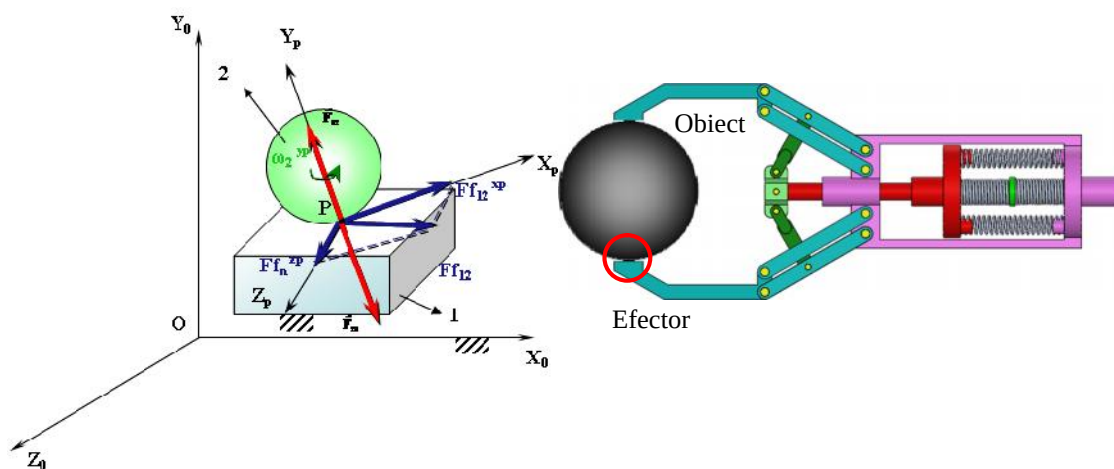


Figura 68. Contact mecanic între obiectul de manipulat (deformabil) și efectorul prehensorului (cu frecare)

Forța de frecare $\vec{F}_{12f}$ se descompune în două componente independente după două axe perpendiculare dispuse în planul tangent comun la suprafețele în contact ($\vec{F}_{12f} = \vec{F}_{12f}^x + \vec{F}_{12f}^z$).

Momentul de frecare este un moment de frecare de pivotare și este egal cu $\vec{M}_{12f}^y = 2/3 \mu_{12} r \vec{F}_{21}$, în care r este raza zonei de contact considerată perfect plană.

Torsesul static în punctul P, originea sistemului de referință $\{P, X_p, Y_p, Z_p\}$, al forțelor cu care efectorul dispozitivului de prehensiune (corpul 1) acționează asupra obiectului de manipulat (corpul 2) este definit de relația 4.40:

$${}^2_{SP}(\vec{F}_{12}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} + \vec{F}_{12f} \\ \vec{M}_P(\vec{F}_{12}) + \vec{M}_{P12f} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{12} + \vec{F}_{12f} \\ \vec{M}_{P12f} \end{matrix} \right\} \quad 4.40$$

În mod corespunzător rezultă un torsor în punctul 0, originea sistemului de referință fixat de efectorul prehensorului.

$$\tau_{so}(\vec{F}_{12}) = \left\{ \frac{\vec{R}_{12}}{M_o(\vec{F}_{12})} \right\} = \left\{ \vec{M}_p(\vec{F}_{12}) + \vec{OP} \times (\vec{F}_{12} + \vec{F}_{12f}) \right\} \quad 4.41$$

4.3. Prehensiunea statică - condiții minime

Se consideră mai întâi cazul simplificat al prehensiunii corpului de manipulat, deformabil elastic, asupra căruia acționează numai forțele de contact $\vec{F}_i$ (Figura 69), normale la suprafața corpului în punctele P_i ($i=1, \dots, n$), prin intermediul elementelor de contact ale prehensorului.

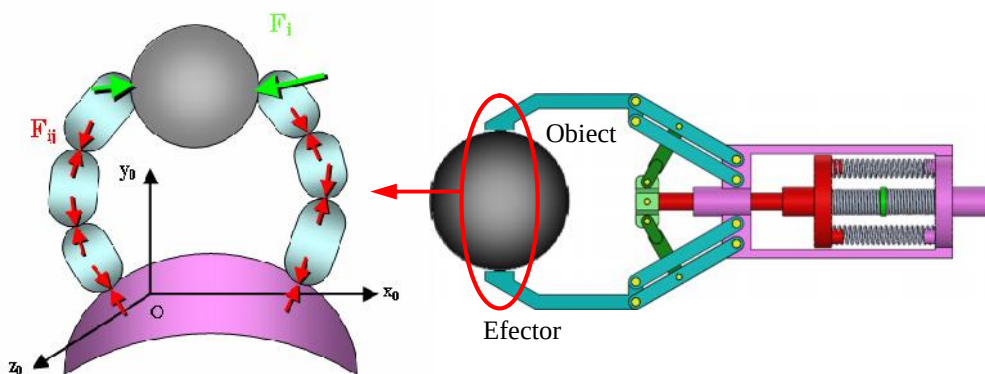


Figura 69. Reprezentarea prehensiunii statice

În fiecare punct P_i se atașează un sistem de referință triortogonal $\{P_i x_i y_i z_i\}$, cu versori $\vec{i}_i, \vec{j}_i, \vec{k}_i$, astfel ca axa z_i să coincidă cu normala $(P_i n_i)$ la suprafața corpului.

De asemenea, fiecare punct P_i se consideră centrul de greutate al unei zone de contact de suprafață Ω_i dispusă într-un plan (π) tangent la suprafața corpului în punctul P_i (forța de contact $\vec{F}_i$ se consideră generată de un corp solid S_i ce contactează corpul considerat în punctul P_i).

În aceste ipoteze în punctele P_i se dezvoltă următoarele forțe: o forță de contact $\vec{F}_i$ ce are ca suport normala $P_i n_i$ la suprafața corpului, o forță de frecare $\vec{F}_{if}$ dispusă în planul tangent la suprafața corpului și un moment de frecare de pivotare ce are ca suport aceeași normală $P_i n_i$ (momentul de frecare de rostogolire se neglijează).

Forța de frecare se opune eventualei mișcări de alunecare în planul π și se descompune în două componente independente după axe dispuse în planul π , ale sistemelor de referință $P_i x_i y_i z_i$, iar momentul de frecare de pivotare se opune posibilei mișcări de pivotare în jurul normalei.

În sistemele de referință $P_i x_i y_i z_i$ fiecărui vector forță, respectiv moment, îi corespunde un torsor în P_i (relația 4.43). Astfel:

$${}^2_{pi}(\vec{F}_{izi}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{izi} \\ \vec{O} \end{matrix} \right\}, {}^2_{pi}(\vec{F}_{ifxi}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{ifxi} \\ \vec{O} \end{matrix} \right\}, {}^2_{pi}(\vec{F}_{ifzi}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{ifzi} \\ \vec{O} \end{matrix} \right\}, {}^2_{pi}(\vec{M}_{if}) = \left\{ \begin{matrix} \vec{O} \\ \vec{M}_{ifzi} \end{matrix} \right\} \quad 4.42$$

cu formele matriceale exprimate în relația:

$${}^2_{pi}(\vec{F}_{izi}) = [0 \ 0 \ F_{izi} \ 0 \ 0 \ 0]^T = F_{izi} [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \\ {}^2_{pi}(\vec{F}_{ifxi}) = [F_{ifxi} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T = F_{ifxi} [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad 4.43$$

$${}^2_{pi}(\vec{F}_{ifyi}) = \begin{bmatrix} 0 & F_{ifyi} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T = F_{ifyi} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$${}^2_{pi}(\vec{M}_{if}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{ifzi} \end{bmatrix}^T = M_{ifzi} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

În calculele calitative se poate renunța la scalării F_i , M_i , obținându-se astfel torsorii elementari.

Fiecare torsor din punctul P_i se exprimă în punctul O, originea sistemului de referință $Ox_0y_0z_0$, considerat fix. Exprimarea torsorilor în sistemul de referință fix se face cu formula matriceală:

$$z_o(\vec{F}_i) = T_{PiO} \cdot {}^2_{pi}(\vec{F}_i) \quad 4.44$$

T_{PiO} este matricea de trecere între cele două sisteme de referință și are forma:

$$T_{PiO} = \begin{bmatrix} C_{PiO}^T & 0 \\ -C_{PiO}^T \Delta(r_{PiO}) & C_{PiO}^T \end{bmatrix} \quad 4.45$$

în care C_{PiO} este matricea cosinușilor directori ce caracterizează poziția unghiulară relativă a celor două sisteme de referință, iar r_{PiO} sunt coordonatele distanței P_iO în sistemul de referință fix cu originea în O.

Ținând cont că:

$$C_{PiO} = \begin{bmatrix} \vec{i}_{Pi} \vec{i}_o & \vec{i}_{Pi} \vec{j}_o & \vec{i}_{Pi} \vec{k}_o \\ \vec{j}_{Pi} \vec{i}_o & \vec{j}_{Pi} \vec{j}_o & \vec{j}_{Pi} \vec{k}_o \\ \vec{k}_{Pi} \vec{i}_o & \vec{k}_{Pi} \vec{j}_o & \vec{k}_{Pi} \vec{k}_o \end{bmatrix} \text{ și } r_{PiO} = \begin{bmatrix} r_{PiOx} \\ r_{PiOy} \\ r_{PiOz} \end{bmatrix} \quad 4.46$$

iar $\Delta(r_{PiO})$ este matricea antisimetrică corespunzătoare vectorului de poziție r_{PiO} :

$$\Delta(r_{PiO}) = \begin{bmatrix} 0 & r_{PiOz} & -r_{PiOy} \\ -r_{PiOz} & 0 & r_{PiOx} \\ r_{PiOy} & -r_{PiOx} & 0 \end{bmatrix} \quad 4.47$$

rezultă torsorul forței $\vec{F}_i$ în punctul O, de forma:

$$\begin{bmatrix} F_{ixO} \\ F_{iyO} \\ F_{izO} \\ M_{ixO} \\ M_{iyO} \\ M_{izO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{PiO}^T & | & 0 \\ - & - & - \\ -C_{PiO}^T \Delta(r_{PiO}) & | & C_{PiO}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{ixi} \\ F_{iyi} \\ F_{izi} \\ M_{ixi} \\ M_{iyi} \\ M_{izi} \end{bmatrix} \quad 4.48$$

Cu torsorii exprimați în sistemul de referință fix se poate forma matricea notată cu P și denumită *matricea de prehensiune*, definită de relația:

$$P = [z_o(\vec{F}_1) \ z_o(\vec{F}_2) \ \dots \ z_o(\vec{F}_i) \ \dots \ z_o(\vec{F}_n)] \quad 4.49$$

În aceste premize *condiția necesară de prehensiune* a corpului considerat față de originea sistemului de referință fix, este exprimată în relația:

$$\text{Rang } P = 6 \quad 4.50$$

Aceasta înseamnă ca prin acțiunea forțelor de contact asupra suprafeței corpului manipulat, sunt generate 6 forțe liniar independente care vor bloca cele 6 mișcări liniar independente posibile.

La condiția de mai sus pentru realizarea prehensiunii trebuie adăugată și condiția de echilibru static a sistemului forțelor de legătură (de contact). În cazul în care s-ar utiliza un sistem de șase legături independente (de rang 6) condiția de echilibru static ar conduce la un sistem omogen de șase ecuații cu șase necunoscute, care nu admite decât soluția banală; evident în astfel de caz prehensiunea corpului nu este posibilă. Ca urmare, rezultă că pentru a realiza prehensiunea corpului în cazul general sunt necesare cel puțin șapte legături exterioare ($\Sigma c = 7$) de rang $c_{12}=6$; într-adevăr, într-un astfel de caz condiția echilibrului static conduce la un sistem omogen de 6 ecuații independente cu 7 necunoscute. Ca urmare, șase dintre forțele de legătură pot fi calculate în funcție de cea de-a șaptea forță care este nedeterminată (independentă); prin intermediul acesteia se reglează prehensiunea corpului.

Sintetic, condiția necesară și suficientă pentru prehensiunea unui corp, în cazul considerării numai a forțelor de contact poate fi formulată astfel: *“Prehensiunea unui corp, care presupune anularea a $c_{12} \leq 6$ grade de libertate, impune utilizarea unui sistem format din minimum $c_{12}+1$ legături de rang c_{12} ”* [96].

În cazul în care se neglijează frecarea, numărul legăturilor dintre corp și elementele de contact este egal cu numărul contactelor punctiforme, iar în premiza considerării frecării, corpurile fiind nedeformabile, numărul legăturilor este de trei ori mai mare (în fiecare contact punctiform o legătură este materializată printr-o forță normală pe planul de tangență și două legături corespund forțelor de frecare liniar independente din planul de tangență); prin urmare, în ultimul caz numărul contactelor punctiforme necesare este considerabil mai mic.

În situația în care asupra corpului acționează și forțe exterioare cum ar fi: forța de greutate și forța de inerție, condiția de prehensiune a corpului considerat presupune că tursorul rezultat al tuturor forțelor în punctul O să fie nul.

Considerând rezultanta R a forțelor exterioare (altele decât forțele de contact), condiția de prehensiune presupune satisfacerea ecuației:

$$[P^*][f] = [R] \quad 4.51$$

în care $[f]$ este matricea amplitudinilor forțelor de contact, iar matricea de prehensiune $[P^*]$ este formată din tursori elementari.

Stabilitatea prehensiunii corpului presupune că forțele de contact normale la suprafața corpului să fie pozitive ($\vec{F}_i > 0$), iar forțele ce tind să învingă forțele generate prin frecare să respecte condițiile:

$$F_{it1}^{*2} + F_{it2}^{*2} \leq \mu_i^2 F_i^2, M_{ip} \leq M_{if} = v \cdot F_i \quad 4.52$$

Dacă considerăm un sistem de două corpuri solide, dintre care unul este corpul manipulat, condiția de prehensiune statică impune ca mecanismul atașat să aibă gradul de mobilitate $M \leq 0$.

4.4. Simularea funcționării dispozitivului de prehensiune

4.4.1. Programul de simulare SolidWorks

SolidWorks este o platformă software cu o largă aplicabilitate în domeniul mecanic, oferind o suită cuprinzătoare de pachete pentru simulări, cu ajutorul cărora se pot crea medii virtuale foarte

asemănătoare cu cele din lumea reală în scopul de a testa proiectele produselor înainte de a trece la procesul de execuție. Construit ca o abordare de inginerie concurentă, SolidWorks ajută să se afle dacă produsul se efectuează în mod corespunzător și cât timp va dura funcționarea acestuia [31].

Astfel, SolidWorks oferă posibilitatea de testa o multitudine de parametri ai produsului precum durabilitatea, răspunsul static și dinamic, mișcarea ansamblului, transferul termic, pentru a evalua performanța proiectului și a îmbunătăți calitatea și siguranța produsului proiectat.

Totodată, SolidWorks a oferit un mediu intuitiv de testare virtuală, testare pe bază de timp și simulare la oboseală, astfel încât să poată răspunde provocărilor comune de inginerie prin soluția încorporată SolidWorks_3D_CAD. Capacitatea de Trend_Tracker și Design_Insight a permis evidențierea modificărilor optime de proiectare chiar în timpul desfășurării procesului de proiectare [31].

În urma simulării, se poate realiza transpunerea oricărei piese modelate sau chiar a unui întreg ansamblu, într-un desen tehnic, care poate fi generat în vederi standard 2D sau 3D. De asemenea, dimensionarea se poate realiza automat sau de către utilizator. Secțiunile se pot realiza într-un plan sau chiar după mai multe planuri.

4.4.2. Etapele simulării

Simularea a fost astfel abordată în diferite moduri, în funcție de:

- 1) tipul interfețelor calculatorului utilizat: analogice, digitale, hibride;
- 2) natura procesului de simulare, respectiv procesul tehnologic al prehensiunii robotice;
- 3) desfășurarea „fluxului” de semnale în procesul de simulare: continuă, discretă sau mixtă;
- 4) relația temporală dintre evenimentele din procesul de simulare: desfășurare în timp real, mai rapid sau mai lent decât această modalitate, desfășurare în timp real cu „monitorizare” prin intermediul tactului propriu al procesului de simulare, posibilitatea de modificare a corelațiilor temporale fiind foarte importantă pentru unele sisteme de simulat.

Cazurile particulare de simulare rezultă din combinarea categoriilor prezentate mai sus, precum și de modelele utilizate; ca exemple se pot da: simularea continuă și analogică, în timp real a unui sistem mecanic sau simularea discretă și digitală, la modul mai rapid decât cel în timp real a unui sistem [48].

Realizarea simulării a fost un proces care se desfășurat în mai multe etape, respectiv:

- formularea problemei;
- colecționarea și prelucrarea primară a datelor;
- formularea modelului de simulare;
- estimarea parametrilor caracteristicilor operative din datele reale și a celorlalți parametri de intrare;
- evaluarea performanțelor modelului și testarea parametrilor;
- construirea programului de calcul (algoritmul simulării);
- validarea programului;
- planificarea experiențelor de simulare;
- analiza datelor simulate.

4.5. Analiza dispozitivului de prehensiune

Odată proiectat ansamblul tridimensional (Figura 70), a fost posibilă verificarea funcționării cinematice și în plus, folosind calcule cinematice și cinetostatice s-au putut obține informații despre forța necesară acționării dispozitivului de prehensiune, vitezele, accelerațiile, forțele și momentele din cuplele dispozitivului. Soluția integrată de calcul cinematic din SolidWorks a preluat ansamblul și a transformat condițiile de asamblare din SolidWorks în cuple cinematice, identificând automat piesele fixe și pe cele în mișcare. Se evită astfel transferul geometriei între două programe separate, cât și definirea individuală a fiecărui tip de cuplă dintre componentele dispozitivului [32]. Apoi s-a definit tipul de mișcare a dispozitivului pentru poziția închis-deschis, tip de mișcare definit deja pentru actuator în capitolul 3.1.2, și s-a comandat rezolvarea calculului cinematic. Astfel în numai câteva minute s-a putut obține forța necesară acționării și reacțiunile din cuple, putându-se astfel dimensiona dispozitivul de prehensiune.

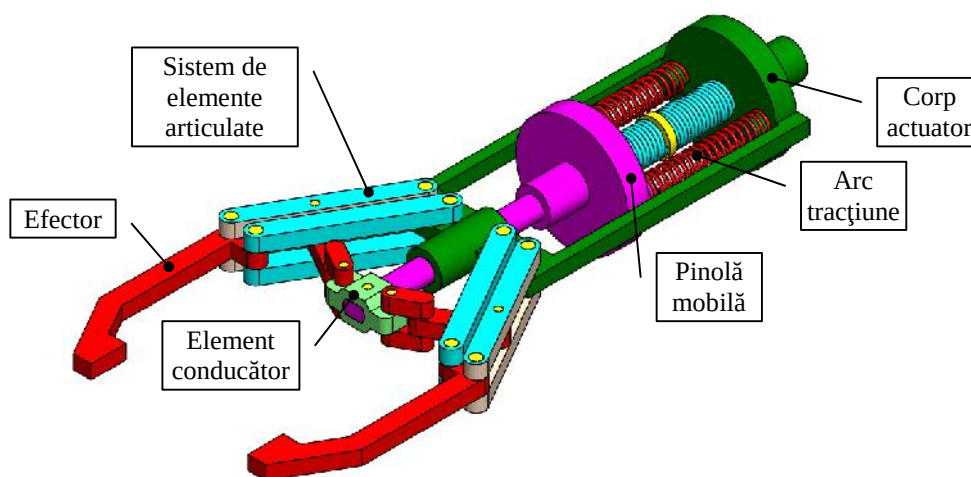


Figura 70. Dispozitivul de prehensiune

Ulterior stabilirii poziției și interdependențelor dintre corpuri, necesare analizării unui ansamblu, s-a procedat la simularea animată a mișcărilor, a mișcărilor de bază sau unui studiu al mișcării. În ultimul caz se poate ține cont de material, natura contactului, forțe și momente, elemente motoare. Chiar și în acest modul, s-a putut realiza un studiu cu element finit, cu observația că se poate discretiza doar un singur corp (în cazul nostru brațul dispozitivului de prehensiune). Modulul de simulare, conferă posibilitatea realizării de simulări cu element finit cu un grad mare de complexitate și precizie [33].

Metoda elementului finit este o metodă numerică de analiză și simulare a proceselor și fenomenelor tehnice. Ideea de bază a metodei constă în divizarea modelului geometric în elemente finite conectate în punctele comune (noduri). Astfel, întregul model este privit în cadrul analizei ca o rețea de elemente discrete interconectate.

Metoda elementului finit se bazează pe ideea comportării variabile a fiecărui element funcție de condiții particulare și calculează comportarea întregului model pe baza informațiilor preluate de la elementele finite care compun modelul.

Pentru rularea simulării, precedând realizarea geometrică a pieselor componente a variantei constructive de DP paralel propus și asamblarea acestora prin stabilirea poziției și interdependențelor dintre corpuri, pentru realizarea unui ansamblu (Figura 70), s-a procedat la discretizarea modelului realizat.

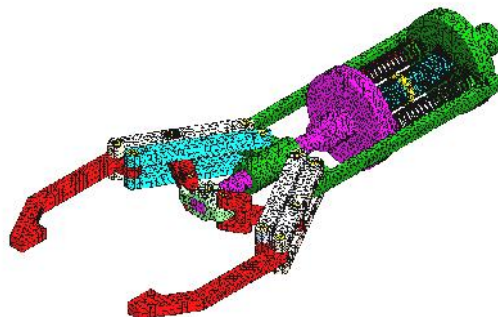


Figura 71. Discretizarea prehensorului paralel

În această metodă operația de discretizare este un pas deosebit de important. SolidWorks realizează automat divizarea modelului în elemente finite, operația fiind denumită discretizare (mesh). Discretizarea se realizează pornind inițial de la o valoare globală a mărimii elementelor finite, valoare rezultată din volumul, suprafața și alte detalii geometrice ale modelului. Rezultatul final al discretizării (numărul de noduri și de elemente finite generate) depind de geometria și dimensiunile modelului, de calitatea elementului impus (draft – grosier sau high - fin), de mărimea elementului, de toleranțe impuse pentru discretizare, de condiții de discretizare locale și de condiții de contact specificate.

În cazul nostru, cele două variante constructive de dispozitive de prehensiune analizate sunt dispozitivul de prehensiune paralel (Figura 71), respectiv și cel unghiular (Figura 72).

În cazul DP paralel, discretizarea folosită a fost de tip Solid Mesh, discretizatorul folosit fiind de tipul Standard mesh, cu 4 puncte Jacobiene, mărimea maximă a unui element fiind de 1,33533 mm, obținându-se o rețea din 81440 de noduri și 121523 de elemente cu o toleranță de 0,0667663 mm.

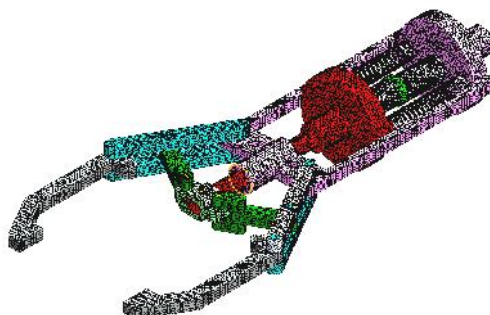


Figura 72. Discretizarea prehensorului unghiular

În cazul DP unghiular, discretizarea folosită a fost de același tip ca și în cazul DP paralel, rețeaua obținută fiind constituită din 78127 de noduri și 114523 de elemente, cu o mărime maximă a unui element de 1,33533 mm, toleranța fiind aceeași (0,0667663 mm).

4.5.1. Alegerea soluției constructive pentru dispozitivul de prehensiune acționat de actuatori cu elemente active din AMF

Din ansamblul anterior s-a preluat efectorului de prindere al dispozitivului de prehensiune pentru a verifica rezistența acestuia la solicitarea statică maximă care apare în timpul funcționării dispozitivului de prehensiune. După preluarea încărcărilor și rezemărilor, s-a generat rețeaua de elemente finite (Figura 71) și s-a rulat rezolvarea ecuațiilor diferențiale pentru obținerea tensiunii echivalente și deformațiilor maxime. SolidWorks a comparat tensiunea maximă cu tensiunea admisibilă a materialului și a oferit hartă de tensiuni unde s-au putut identifica zonele periculoase, unde coeficientul de siguranță a fost mai mic decât cel impus de acesta. În cazul de față, s-a constatat că efectorul respectiv rezistă la solicitarea maximă, coeficientul de siguranță (raportul dintre tensiunea admisibilă și tensiunea echivalentă maximă) fiind peste 3, deci s-a rulat un calcul de optimizare, pentru a reduce masa acestui braț (notat cu litera A - Figura 73).

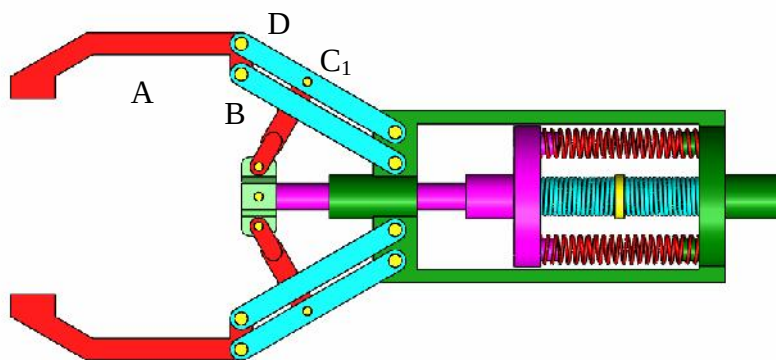


Figura 73. Soluția propusă - Prehensor paralel

Pe baza studiului static anterior, s-a introdus ca obiectiv minimizarea masei efectorului, având ca și constrângere tensiunea echivalentă maximă mai mică decât tensiunea admisibilă, iar parametrul care va fi ajustat va fi grosimea efectorului. Sistemul a rulat un număr de minim 10 cicluri de optimizare până la găsirea unei soluții convergente. De notat este faptul că odată găsită soluția optimă, SolidWorks a modificat geometria piesei după confirmarea utilizatorului de validare a studiului de optimizare.

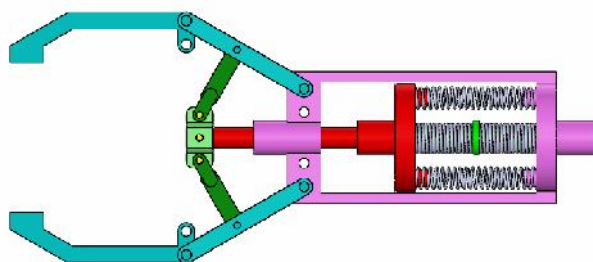


Figura 74. Soluția propusă - Prehensor unghiular

În vederea posibilității unei analize comparative tipologice a funcționării diferitelor categorii de prehensori (prehensorul paralel și cel unghiular), s-a procedat la executarea celui de-al doilea tip prin înlăturarea a unei perechi de elemente articulate notate cu B (Figura 73), procedându-se apoi la rigidizarea cuplei cinematice C_1 (Figura 73) și a elementelor A și D prin comanda MATE pentru fiecare braț în parte, rezultând prehensorul unghiular din Figura 74.

După rularea studiului de optimizare și obținerea unei grosimi mai mici a brațului s-a rulat un calcul la oboseală pentru a verifica dacă brațul respectiv va rezista la un număr de un milion de cicluri de funcționare. SolidWorks este singura soluție de calcul cu element finit integrată într-un sistem CAD care dispune de module avansate de calcul cum sunt calculul la oboseala, „drop test”, optimizare și calcul nelinier.

4.5.2. Analiza structurală a dispozitivului de prehensiune

Condiția ca dispozitivele de prehensiune să funcționeze într-un mod cât mai asemănător cu mâna umană este impusă de criterii de sinteză structurală [88].

Datorită faptului că un așa-zis „deget” al dispozitivului nu este constituit decât din cuple de rotație monomobile între elemente (falange), principalele criterii de sinteză structurală sunt numărul degetelor, numărul falangelor degetelor, dimensiunile relative ale falangelor, poziționarea reciprocă a degetelor și gradul de mobilitate al dispozitivului de prehensiune.

Schemele cinematice ale celor două variante de dispozitive de prehensiune sunt prezentate în Figura 76.

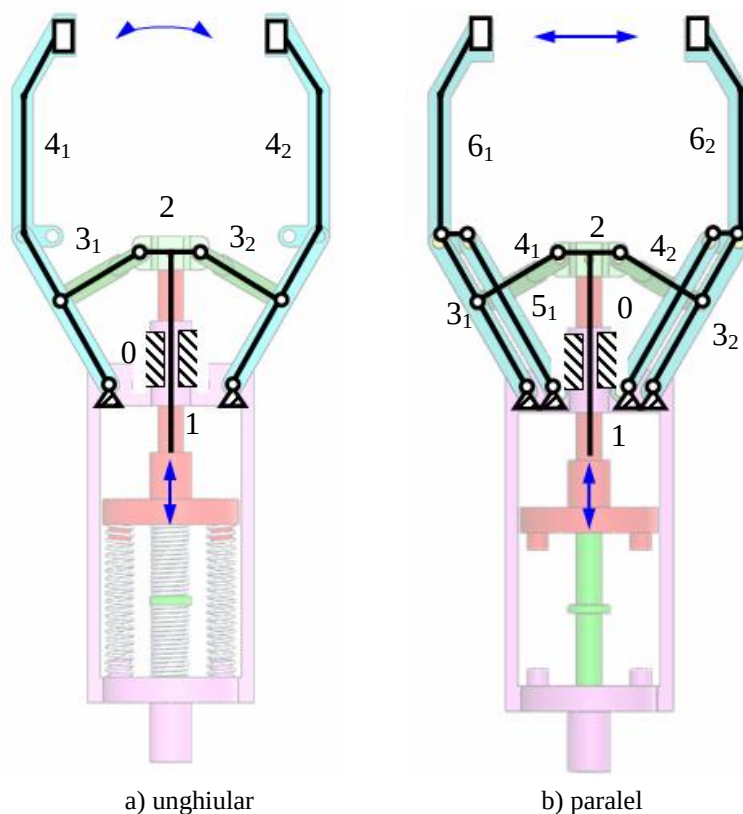


Figura 76. Schema cinematică a dispozitivelor de prehensiune

Se observă în Figura 76a că elementul 2 transmite mișcarea de la elementul motor 1 elementului 3₁, care la rândul său transmite mișcarea elementului final 4₁.

De asemenea, lanțul cinematic 1-2-3₁-4₁ este simetric cu lanțul cinematic 1-2-3₂-4₂, care se raportează la planul de simetrie.

Ca și componență, lanțul cinematic este un lanț simplu deschis 1-2-3₁-4₁, constituit din 4 elemente, o cuplă de translație (C_5) și trei cuple de rotație (C_5). Gradul de libertate (L) al lanțului cinematic, grad ce reprezintă numărul parametrilor independenți care poziționează elementele lanțului, se calculează conform relației:

$$L_U Z 3 \dot{e} n J 2 C_5 J C_4 Z 3 \dot{e} 3 J 2 \dot{e} 4 J 0 Z 9 J 8 Z 1 \quad 4.53$$

Întregul mecanism unghiular este compus dintr-un număr total de 6 elemente legate între ele prin intermediul a 7 cuple cinematice, una de translație și 6 de rotație, toate cuplele fiind de clasa 5.

Gradul de mobilitate al dispozitivului de prehensiune este determinat cu relația:

$$M_U Z 3 \dot{e} n J 2 C_5 J C_4 Z 3 \dot{e} 3 J 2 \dot{e} 4 J 0 Z 9 J 8 Z 1 \quad 4.54$$

Spre deosebire de mecanismul unghiular, mecanismul paralel este compus dintr-un număr total de 9 elemente legate între ele prin intermediul a 13 cuple cinematice, una de translație și 12 de rotație, toate cuplele fiind de clasa 5.

În cazul dispozitivului de prehensiune paralel (Figura 76b), acesta conține două lanțuri cinematice, și anume: lanțul cinematic 1-2-4₁-3₁-5₁-6₁, care este simetric cu lanțul cinematic 1-2-4₂-3₂-5₂-6₂, care se raportează la planul de simetrie.

Ca și componență, lanțul cinematic 1-2-4₁-3₁-5₁-6₁ se constituie din 5 elemente, o cuplă de translație (C_5) și șase cuple de rotație (C_5). Gradul de libertate (L) al lanțului cinematic, grad ce reprezintă numărul parametrilor independenți care poziționează elementele lanțului, se determină cu relația:

$$L_P Z 3 \dot{e} n J 2 C_5 J C_4 Z 3 \dot{e} 5 J 2 \dot{e} 7 J 0 Z 15 J 14 Z 1 \quad 4.55$$

În mod similar s-a procedat și pentru calculul gradului de libertate și mobilitate pentru mecanismul de prehensiune paralel.

$$M_P Z 3 \dot{e} n J 2 C_5 J C_4 Z 3 \dot{e} 9 J 2 \dot{e} 13 J 0 Z 27 J 26 Z 1 \quad 4.55$$

Pentru ambele cazuri, mecanismul prehensor, având un singur element motor și gradul de mobilitate fiind egal cu numărul elementelor motoare, respectiv cu unu, rezultă că mecanismele îndeplinesc condiția de desmodromie și sunt desmodrome, deci legăturile dintre elemente asigură o mișcare univoc determinată a oricărui element condus.

4.5.3. Analiza cinematică a dispozitivului de prehensiune

Studiul comportării cinematice este necesar pentru proiectarea și modelarea unui DP, dar acest studiu neluând însă în considerare forțele implicate în producerea mișcării din modelul cinematic. Mai mult, pentru efectuarea studiului cinematic sunt importante atât proprietățile geometrice ale cuplelor cinematice cât și timpii de mișcare.

Problematica studiului cinematic implică studiul a două aspecte, respectiv cinematica directă, care presupune poziționarea și orientarea elementelor în raport cu un sistem cartezian, cel de-al

doilea aspect, respectiv cinematica inversă, referindu-se la calculul variabilelor articulațiilor pe baza informațiilor poziției și orientării efectorilor finali.

Astfel, pentru a putea concretiza analiza cinematică directă și o analiză asupra influenței tipologice a DP, s-au ales două puncte caracteristice (A) și (B), punctul caracteristic A fiind situat la limita superioară a elementului motor, iar punctul caracteristic B la limita superioară a suprafeței de contact a efectorului final (Figura 77).

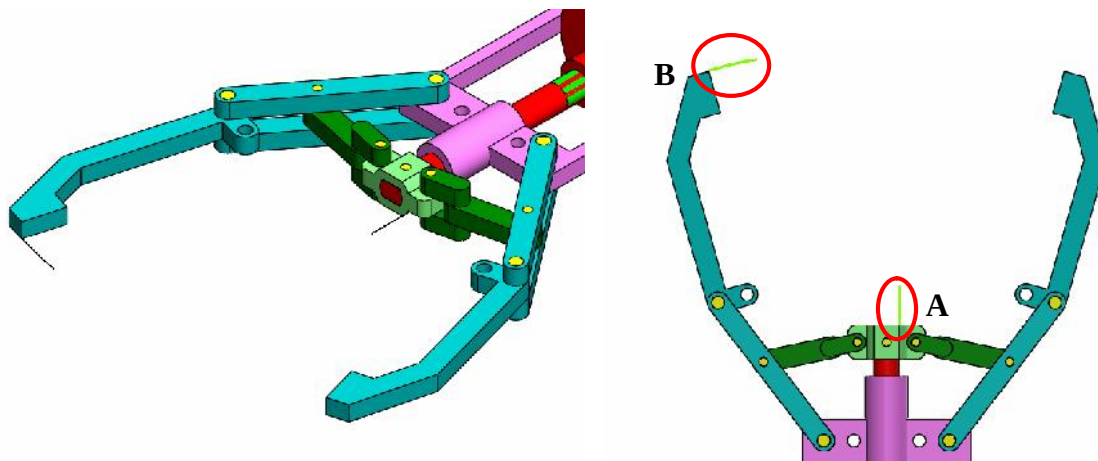


Figura 77. Traiectoriile punctelor caracteristice alese în cazul dispozitivului unghiular

Pentru elementul motor al DP, s-au impus deplasări axiale longitudinale, cu o variație sinusoidală a amplitudinii deplasării în funcție de timp.

În urma simulării făcută pentru studiul mișcării (Motion Study) a DP unghiular a reieșit că în timp ce punctul caracteristic A efectuează o cursă maximă de 9 de mm, traiectoria punctului caracteristic B are o lungime de 9,8 mm (Figura 78).

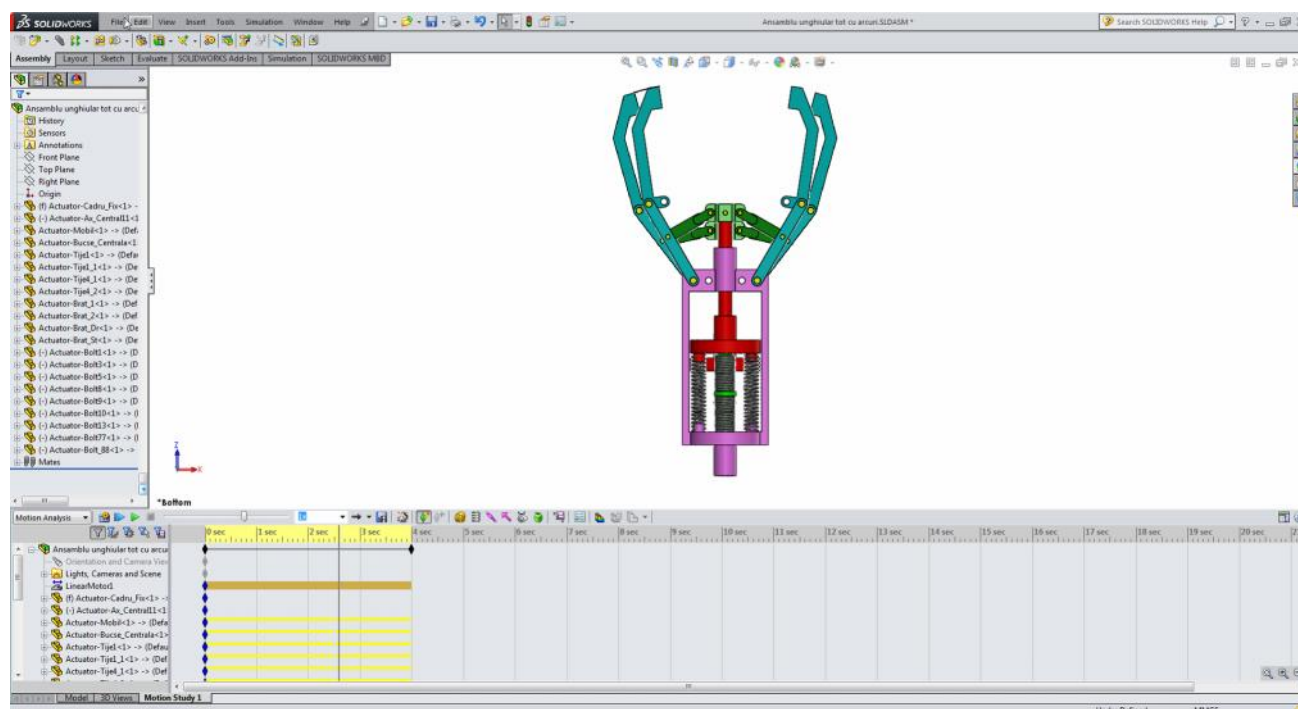


Figura 78. Studiul deplasării – prehensor unghiular (pozițiile deschis - închis)

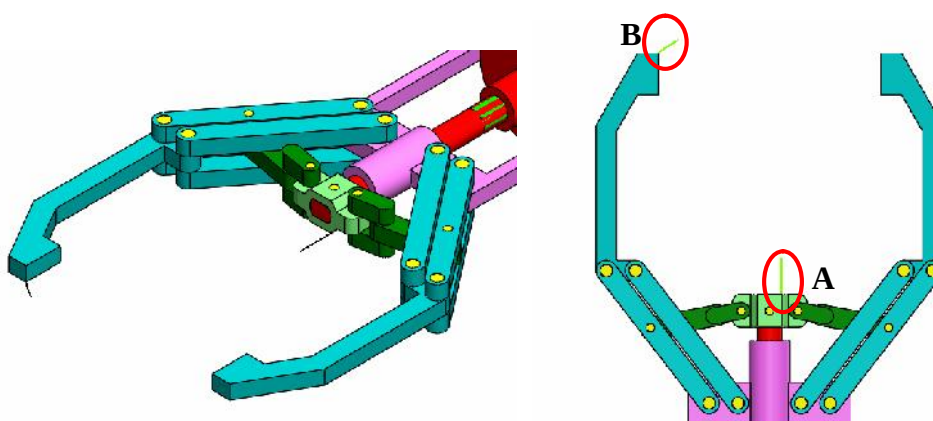


Figura 79. Traiectoriile punctelor caracteristice alese în cazul dispozitivului unghiular

În mod similar s-a procedat la simularea numerică a DP paralel, punctele caracteristice A și B rămânând aceleași (Figura 79).

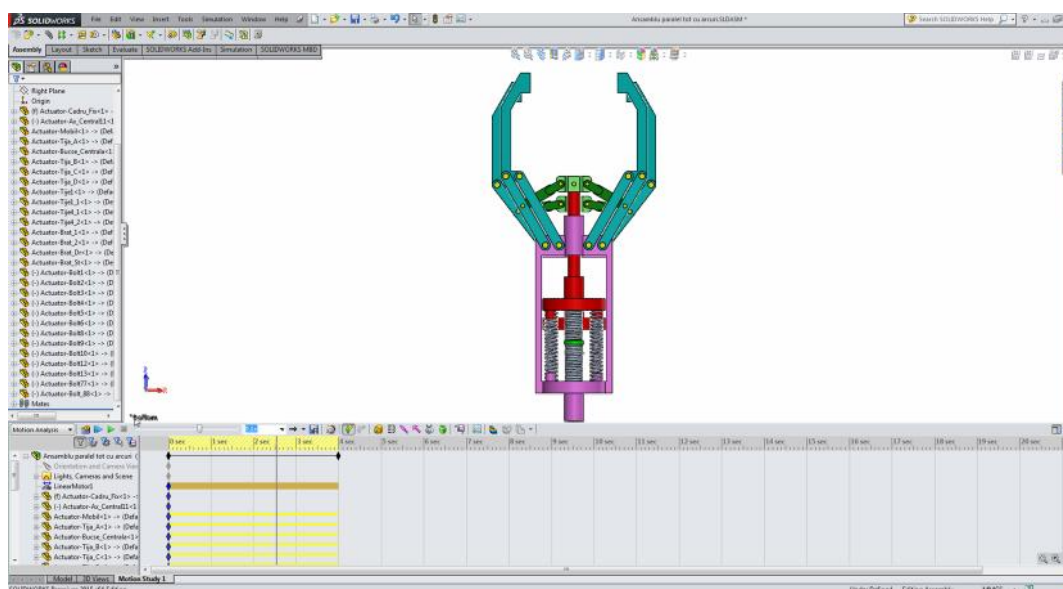


Figura 80. Studiul deplasării – prehensor paralel (pozițiile deschis - închis)

Simularea făcută pentru studiul mișcării a DP paralel a relevat că la o aceeași lungime a traiectoriei a punctul caracteristic A de 9 mm, traiectoria punctului caracteristic B are o lungime de doar 8,6 mm (Figura 80).

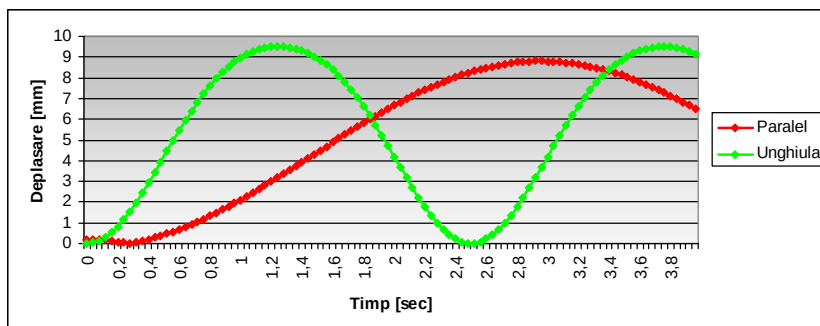


Figura 81. Comparația deplasărilor punctului caracteristic al efectorului final

O analiză comparativă a fost realizată în scopul de a defini influența tipologiei DP (paralel sau unghiular) asupra deplasării efectorului final, deplasare caracterizată de evoluția punctului caracteristic selectat, în condițiile în care dimensiunile de gabarit ale DP au fost identice. Reprezentarea grafică a evoluțiilor punctului caracteristic B pentru cele două tipuri de DP este reprezentată în Figura 81.

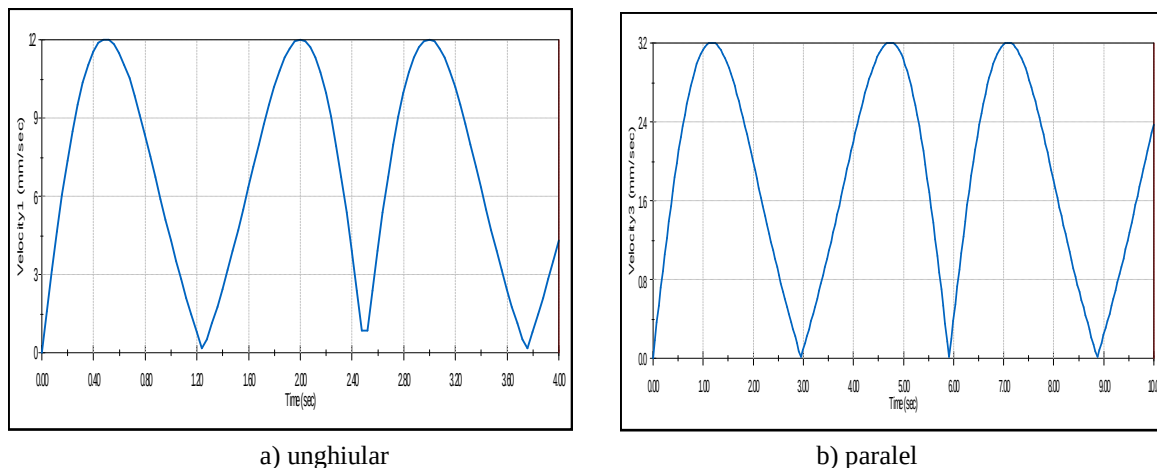


Figura 82. Evoluția vitezelor de deplasare

De asemenea, în urma analizei cinematice s-au trasat și graficele de evoluție a vitezelor de deplasare pentru cele două cazuri studiate, grafice prezentate în Figura 82. Se poate observa că în timp ce durata unui ciclu complet al DP unghiular are o durată de 2,5 secunde, durata unui ciclu complet al DP paralel este mai mare, respectiv 5,8 secunde.

Concluzia ce s-a desprins în urma studiului comparativ rezidă că DP unghiular este mai în concordanță cu obiectivele propuse de realizat, acest tip de DP dispunând nu numai de o viteză de deplasare pentru prehensiune mai ridicată decât DP paralel, ci și de o deplasare mai amplă. DP paralel, datorită construcției sale, are o oarecare limitare constructivă ceea ce diminuează viteza de deplasare a efectorilor finali.

Funție de aplicația dorită se poate selecta tipul de prehensor ce urmează a fi utilizat, DP unghiular fiind preferat în cazul unor aplicații ce necesită o durată de prehensare mai mică, în timp ce în cazul în care este necesare o precizie mai ridicată a obiectului manipulat este de preferat utilizarea DP paralel.

S-a procedat apoi la simularea DP în cazul răcirii naturale a elementelor active din Nitinol și în cazul răcirii forțate cu aer. Pentru aceasta, caracteristicile definitorii ale modelului de simulare în cazul DP au fost considerate ca fiind timpul de pornire, la 0 secunde, timpul de oprire, la 10 secunde. S-a optat pentru incrementarea automată a pașilor de analiză, fiind permise deplasări și deformări mari, s-a considerat efectul termic, fiind incluse totodată și încălzirile termice, temperatura pentru deformare zero fiind considerată 298 K.

Tipul de analiză considerat a fost FFEPlus, această metodă fiind preferată în cazul analizelor de tip nonlinear deoarece presupune o rezolvare iterativă, asumarea unei soluții aproximative la rezolvarea ecuațiilor algebrice, după care prin cuantificarea erorii, trece la reiterare, până când eroarea se încadrează în limitele admise și setate, opțiunile de asociere la incompatibilitate fiind mai precise.

Ca tehnică de control s-a optat pentru forțarea rezolvării, tehnica de iterare fiind NR (Newton-Rapson), aceasta fiind o metodă de identificare succesivă a aproximării celei mai bune, cu

privire la rădăcinile sau zerourile valorilor reale ale funcției. Metoda de integrare aleasă a fost metoda Newmark, fiind folosită pentru rezolvarea ecuațiilor diferențiale, respectiv la evaluarea numerică a răspunsurilor dinamice ale structurilor și solidelor, în cazul analizelor sistemelor dinamice și analizelor cu elemente finite.

În Figura 83 se prezintă evoluția deplasării punctului caracteristic al elementului motor în cazul în care răcirea elementelor active din AMF se realizează natural. Durata unui ciclu în acest caz este 9,6 secunde.

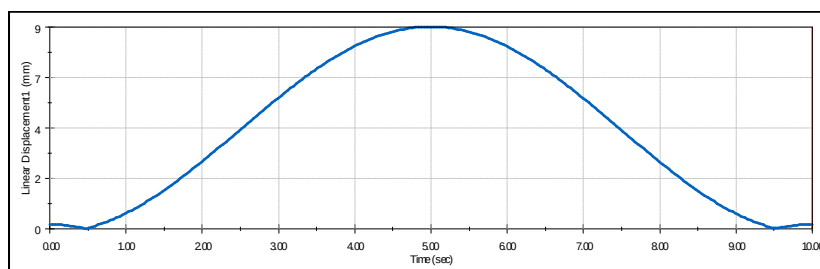


Figura 83. Evoluția deplasării în cazul răcirii naturale

În cazul în care pentru răcirea mai rapidă a elementelor active din AMF este insuflat un flux de aer, se observă foarte ușor ca durata unui ciclu de funcționare se reduce drastic de la 9,6 secunde la 5,6 secunde (Figura 84). Acest fenomen a fost simulat pentru situația în care atât arcurile de compresiune cât și arcurile de tracțiune sunt răcite alternativ (Figura 85).

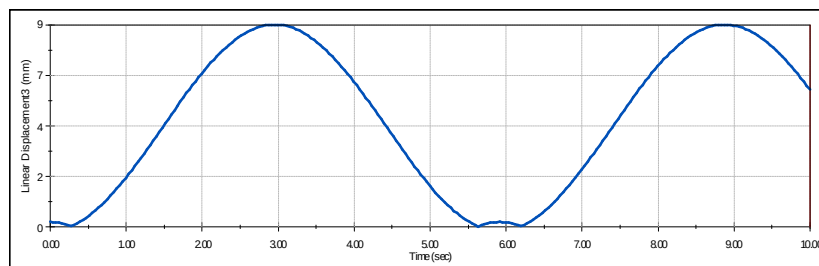


Figura 84. Evoluția deplasării în cazul răcirii forțate cu aer

Răcirea cu aer s-a considerat pentru o funcționare într-o manieră cât mai echilibrată a DP, pentru a echilibra perioada de încălzire care se realizează suficient de rapid cu perioada de răcire, respectiv de învingere a inerției termice a firelor din care s-au confecționat arcurile din AMF.

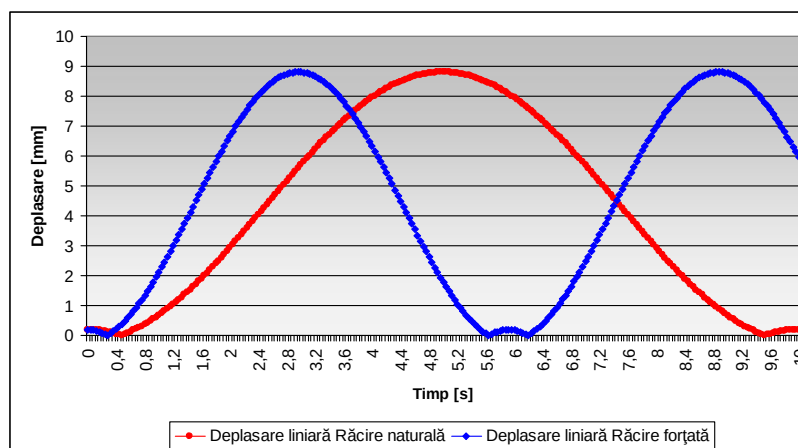


Figura 85. Comparație a deplasărilor funcție modul de răcire

De menționat este faptul că în cazul utilizării unei incinte controlate care să asigure circulația fluidului mai rapid, rezultatele pot fi spectaculoase, durata unui ciclu de funcționare putând fi redusă cu mai mult de 50%.

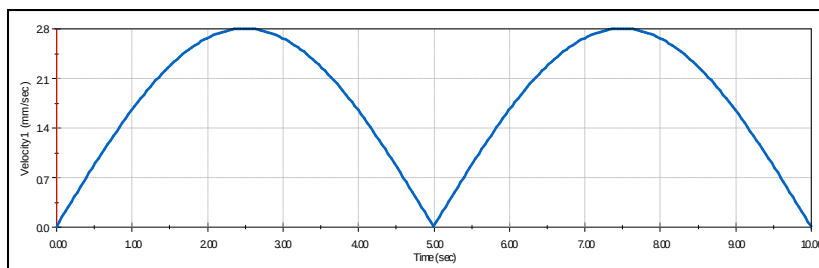


Figura 86. Evoluția vitezei de deplasare în cazul răcirii naturale

În mod similar s-a procedat la simularea numerică a vitezelor de deplasare a punctului caracteristic A aparținând elementului motor. Evoluția vitezei de deplasare în cazul răcirii naturale este prezentată în Figura 86. Se poate observa că valoarea maximă atinsă este de 2,8 mm/sec, durata unui ciclu complet fiind de 5 secunde.

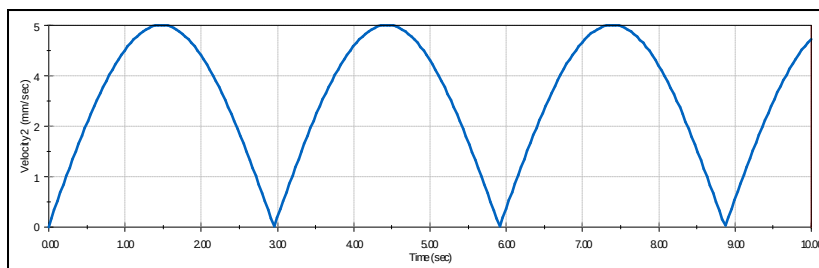


Figura 87. Evoluția vitezei de deplasare în cazul răcirii forțate cu aer

Spre deosebire de durata unui ciclu, care suferă o scădere în cazul răcirii forțate cu aer, fiind redusă la 2,8 secunde, valoarea vitezei cunoaște o creștere semnificativă, aceasta ajungând la 5 mm/sec (Figura 87).

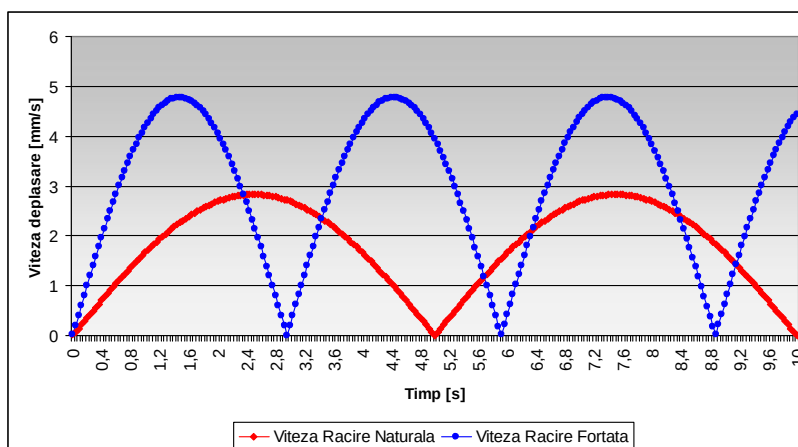


Figura 88. Analiza comparativă a evoluției temporale a vitezelor (răcire naturală și forțată)

Acest fenomen era previzibil, fiind cunoscut faptul că viteza reprezintă derivata deplasării, evoluția vitezei având o formă exponențială. Simularea s-a repetat după ce în prealabil s-a efectuat verificarea modelului și reanalizarea setarilor, în vederea simplificării și optimizării modelului (Figura 88). Simularea a durat aproximativ la fel iar valorile deplasărilor au fost foarte apropiate de cele precedente. S-a considerat astfel că modelul elaborat este un model concludent.

4.5.4. Analiza cinetostatică a dispozitivului de prehensiune

Simularea nu s-a realizat doar în idea calcului cinematic și determinarea caracterului dinamic al DP, prin intermediul acesteia s-a urmărit și stabilirea forțelor și tensiunilor ce apar în cuplele și elementele corespunzătoare în vederea definirii aspectului cinetostatic al DP.

Tensiunile generate de forțele de prehensiune nu trebuie să depășească valorile admisibile specifice materialelor alese dar să verifice condiția minimă de prehensiune, iar deplasările să se situeze în limitele convenite analitic, realizându-se o optimizare constructiv funcțională a întregului DP.

Conform modelului matematic elaborat și prezentat în capitolul 4.2.2.3 *Contact mecanic în ansamblul obiect de manipulat (deformabil) - braț prehensor cu frecare*, s-a procedat la efectuarea simulării numerice în vederea determinării forțelor din cuplele cinematice al DP.

Pentru ca studiul cinetostatic să reflecte comportarea DP, la simulare au fost definite tipurile de contacte din cuplele cinematice ce leagă componentele DP, fixările și constrângerile caracteristice pentru anumite componente.

Deplasarea axială longitudinală a elementului motor a rezultat ca urmare a definirii forței motoare aplicată acestuia. Forța a fost definită ca fiind armonică, cu valoarea maximă de 4 N, și cu o ciclicitate a frecvenței de 5Hz. Această forță are rolul de a înlocui forța dezvoltată de arcurile de compresiune din AMF (Figura 89), generând o variație sinusoidală a amplitudinii deplasării în funcție de timp.



Figura 89. Simularea dispozitivului de prehensiune în funcționare liberă

Amplitudinea maximă a deplasării elementului motor a atins valoarea de 11,55 mm, valorile deplasării situându-se în intervalul (-5,42 – 6,13), conform Figurii 89.

Simularea s-a realizat pentru o perioadă de 3 secunde, cu o eșantionare de 0,4 secunde.

În urma simulării a reieșit faptul că cele mai ridicate valori ale forței de reacțiune apar în cupla cinematică marcată cu culoarea roșie și notată cu C_S și în cupla conducătoare marcată cu culoare albastră și notată C_C în Figura 90.

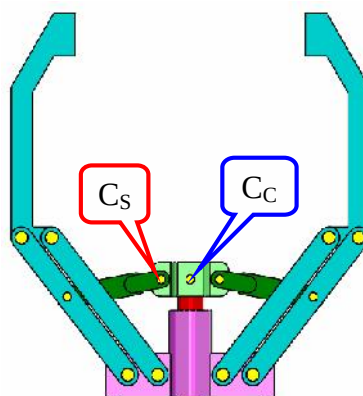


Figura 90. Reprezentarea cuplelor caracteristice

Pentru verificarea comportării DP s-a introdus și o sarcină în punctul caracteristic B (Figura 91) selectat anterior pe efectorul final, sarcină ce a constat în aplicarea unei forțe elastice cu constanta de 1 N.

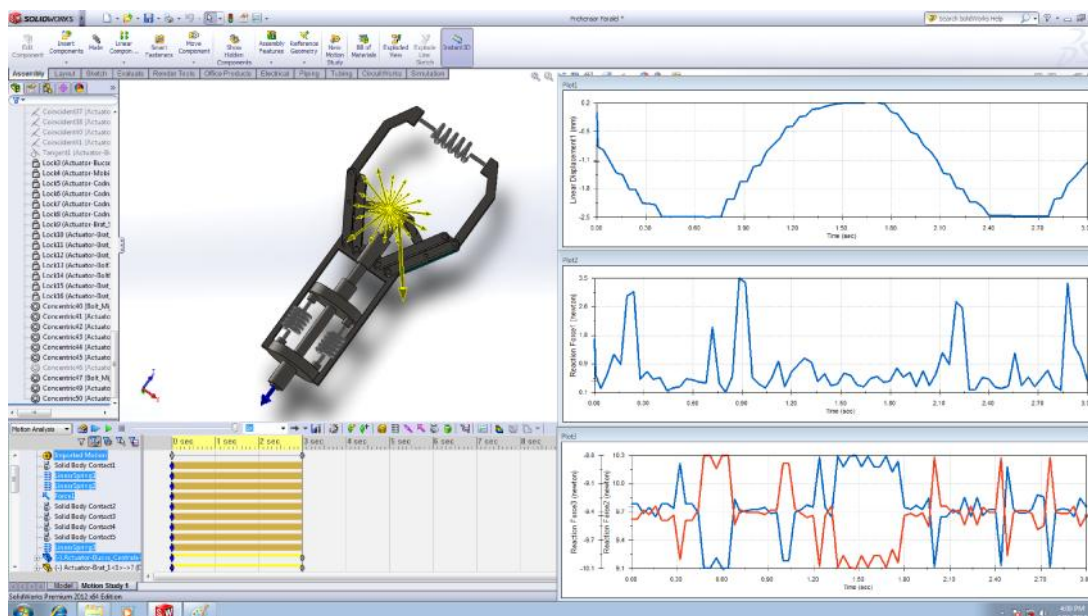


Figura 91. Simularea dispozitivului de prehensiune cu sarcină aplicată

Diferența deplasării elementului motor în cele două cazuri, liber și în sarcină, este reprezentată în Figura 92.

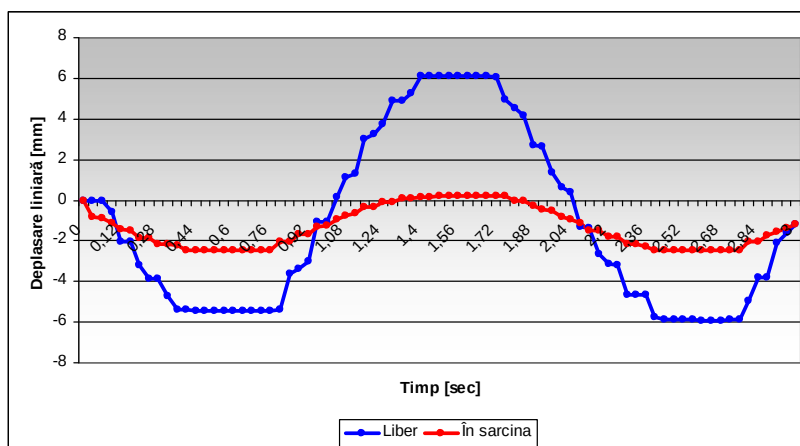


Figura 92. Reprezentarea evoluției deplasării elementului motor

Se observă că în momentul aplicării sarcinii, amplitudinea evoluției deplasării elementului motor este diminuată la 2,69 mm, valorile limită absolute fiind -2,48 și 0,21. Se observă că forma de evoluție a deplasării a cuplei C_S este aceeași, în cazul aplicării unei sarcini diminuându-se proporțional ca valoare.

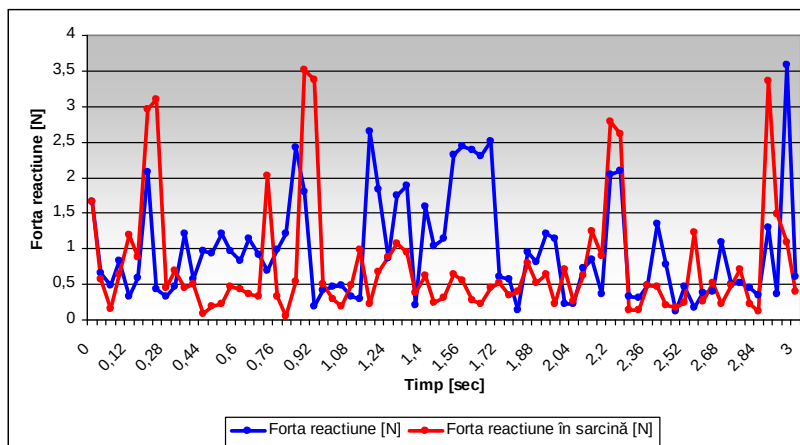


Figura 93. Forțele de reacțiune din cupla C_S

Valoarea maximă calculată a forței necesare din cupla C_S ajunge la 3,58 N în cazul în care DP efectuează mișcarea necesară prehensiunii fără ca efectorii finali să fie solicitați de forța elastică aplicată, în timp ce în cel de-al doilea caz, valoarea maximă este de 3,51 N (Figura 93).

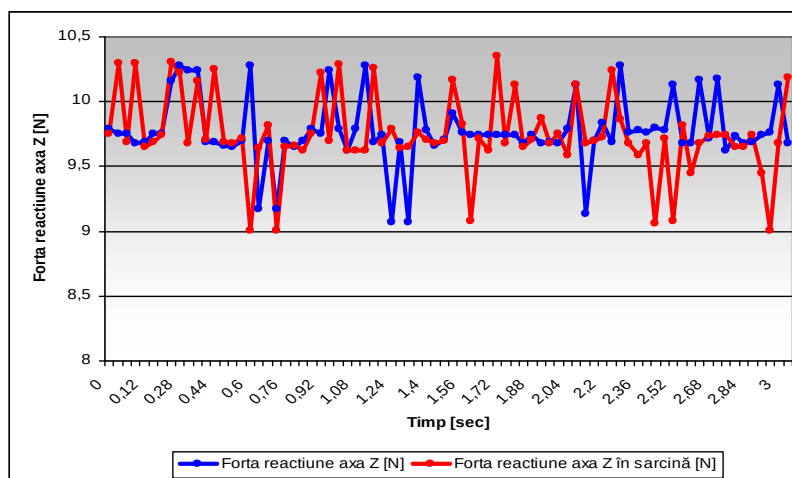


Figura 94. Componenta după axa Z a forțelor de reacțiune cupla C_C

După descompunerea forțelor ce apar în cupla cinematică conducătoare C_C , s-a confirmat că valoarea maximă este de-a lungul axei Z (Figura 94), axa Z fiind axa de-a lungul căreia elementul motor execută deplasarea axială longitudinală. Valoarea maximă a forței motoare după axa Z în cupla conducătoare C_C este de 10,27 N în cazul în care mișcarea este făcută fără aplicarea sarcinii din punctul caracteristic B al efectorului final și 10,34 N în situația aplicării sarcinii în același punct caracteristic B.

Se observă că forța elastică de rezistență se manifestă cu preponderență ca și componentă pe o direcție perpendiculară pe direcția de deplasare a elementului conducător, mecanismul asigurând prin construcția sa o participare redusă a forței pe care trebuie să o dezvolte elementul conducător.

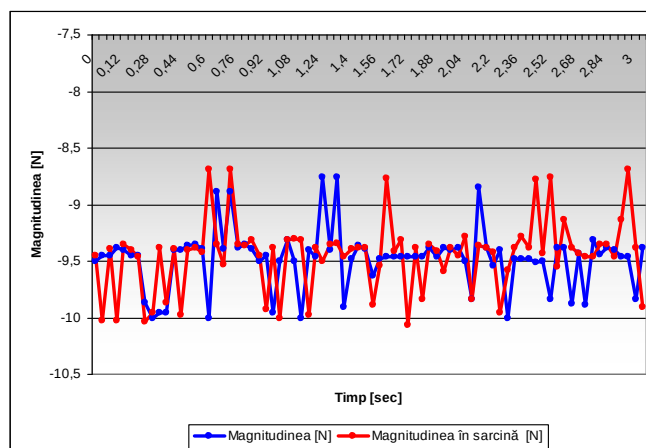


Figura 95. Comparația magnitudinilor din cupla conducătoare

Valorile absolute și forma de evoluție a forței manifestate în cupla cinematică conducătoare C_C confirmă randamentul bun al mecanismului, deoarece acestea sunt foarte apropiate de cele ce se manifestă de-a lungul axei Z (Figura 95).

4.6. Concluzii și contribuții personale

Simularea efectuată cu ajutorul programului de simulare SolidWorks a prezentat un o serie de avantaje față de alte tehnici de modelare, aceasta oferind posibilitatea de a investiga procedurile de operare sau reguli de decizie, testarea ipotezelor privitoare la fenomenele ce pot apărea în timpul funcționării DP. De asemenea, timpul a putut fi comprimat sau dilatat pentru a permite accelerarea sau încetinirea fenomenului investigat, fiind posibil în acest fel observarea interacțiunilor dintre diferite variabile și determinarea influenței acestor variabile asupra performanței DP. Totodată, asociată cu animația pentru vizualizarea modului de funcționare a DP, simularea a contribuit la creșterea capacității de intervenție prin perceperea mai largă a oportunităților și prin clarificarea și evaluarea efectelor unor eventuale acțiuni.

Simularea a oferit posibilitatea construcției modelului pe baza preferințelor și din perspectiva autorului. Construirea modelului de simulare a necesitat totuși o instruire specială, aceasta fiind o deprindere care se învață în timp și prin experiență.

Simularea însă nu a garantat obținerea unor soluții optime, din cauza naturii aleatoare a intrărilor modelului de simulare, rezultatele fiind variabile stohastice, fiind necesare cunoștințe statistice pentru analiza lor. În cazul reducerii necorespunzătoare a resurselor de modelare și analiză se poate ajunge la obținerea unui model de simulare necorespunzător pentru scopul analizei. Calitatea rezultatelor obținute prin simulare a depins major de calitatea datelor folosite, colectarea datelor necesare simulării fiind uneori dificilă și consumatoare de timp.

Au fost concepute și simulate două tipuri constructive de DP, respectiv DP unghiular și DP paralel, concluzia desprinsă în urma studiului comparativ relevând că DP unghiular este mai în concordanță cu obiectivele propuse de realizat, acest tip de DP dispunând nu numai de o viteză de deplasare pentru prehensiune mai ridicată decât DP paralel, ci și de o deplasare mai amplă. DP paralel, datorită construcției sale, are o oarecare limitare constructivă ceea ce diminuează viteza de deplasare a efectorilor finali.

În funcție de aplicația dorită se poate selecta tipul de prehensor ce urmează a fi utilizat, DP unghiular fiind preferat în cazul unor aplicații ce necesită o durată de prehensare mai mică, în timp ce în cazul în care este necesare o precizie mai ridicată a obiectului manipulat este de preferat utilizarea DP paralel.

Analiza structurală a DP a dovedit că mecanismele de prehensiune propuse îndeplinesc condiția de desmodromie și sunt desmodrome.

Analiza cinematică a DP a oferit posibilitatea vizualizării și determinării preciziei de poziționare și orientare a elementelor DP, și calculul variabilelor articulațiilor pe baza informațiilor poziției și orientării efectorilor finali, respectiv graficele de evoluție a vitezelor de deplasare, respectiv determinarea caracterului funcțional și dinamic al DP.

Răcirea cu aer s-a considerat pentru o funcționare într-o manieră cât mai echilibrată a DP, pentru echilibrarea perioadei de încălzire perioada de răcire și învingerea inerției termice a arcurilor din AMF, reducerea unui ciclu complet de funcționare a DP ajungând de la 5 secunde la 2,8 secunde. Rezultate mai bune se pot obține în cazul utilizării unei incinte elastice controlate care să înglobeze arcurile din AMF, asigurând în acest mod o circulație mai direcționată și mai rapidă a fluxului de aer.

Analiza cinetostatică a DP a avut în vedere stabilirea forțelor și tensiunilor ce au apărut în cuplele și elementele corespunzătoare pentru verificarea condiției minime de prehensiune. S-a avut de asemenea în vedere menținerea tensiunilor generate de forțele necesare prehensiunii mecanice în limitele admisibile specifice materialelor alese și a deplasărilor în limitele convenite analitic.

Contribuții personale

Contribuțiile personale constau în elaborarea modelului matematic a fenomenului de memoria formei și a modelării prehensiunii mecanice prin realizarea modelului matematic al contactului pentru diferite tipuri de contacte mecanice, determinându-se condițiile minime pentru prehensiunea statică.

S-au realizat scheme structurale și cinematice, gradele de complexitate ale acestora fiind variate, toate fiind relevante pentru analizele ulterioare efectuate și s-a analizat amănunțit din punct de vedere structural, cinematic și cinetostatic mecanismul de prehensiune.

A fost verificată condiția de desmodromie a celor două mecanisme de prehensiune propuse, respectiv unghiular și paralel.

Modelele celor două variante de DP s-au construit cu maximă precizie și s-a demonstrat funcționalitatea acestora prin simulare.

S-a realizat analiza cinematică, analitic și prin simulare, reliefând atât influența tipologiei geometrice cât și influența răcirii forțate a elementelor active din AMF asupra comportării dinamice a DP și analiza cinetostatică a DP în vederea validării condițiilor minime obținute analitic.

5. CAPITOLUL V. CONSTRUCȚIA MODELULUI FUNCȚIONAL

5.1. Realizarea dispozitivului de prehensiune acționat de actuatorul cu elemente active din aliaje cu memoria formei

Imprimarea 3D este procesul prin care s-au putut realiza obiectele solide tridimensionale proiectate în modelul digital. Imprimarea s-a realizat prin aplicarea unor straturi succesive de material, acest mod de imprimare fiind diferit de tehnicile tradiționale, care se bazează în mare parte pe îndepărtarea materialului, cum ar fi tăierea, frezarea sau găurirea cu ajutorul mașinilor cu comandă numerică sau a roboților industriali.

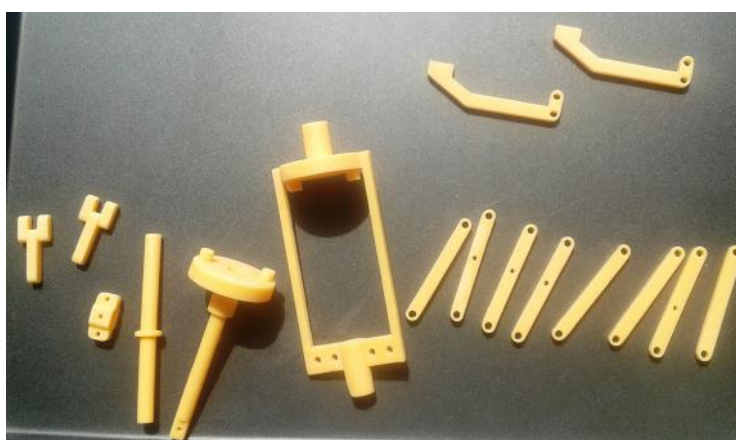


Figura 96. Părțile componente ale prehensorului

Tehnologia de imprimare 3D utilizată a creat posibilitatea producerii modelelor detaliate arhitectural (Figura 96) într-o gamă largă de materiale, inclusiv fotopolimeri rigizi gata pentru vopsire. În cazul de față, fiind necesară construcția unui model capabil să suporte sarcini mecanice cu valori relativ ridicate, tehnologia de sinterizare a straturilor de pulbere depusă cu ajutorul laser-ului a oferit posibilitatea execuției unor piese din materiale termoplastice de producție de calitate.

Componentele DP au fost elaborate pe o imprimantă 3D marca ProJet 4500 3D având o precizie de +/- 50 microni.

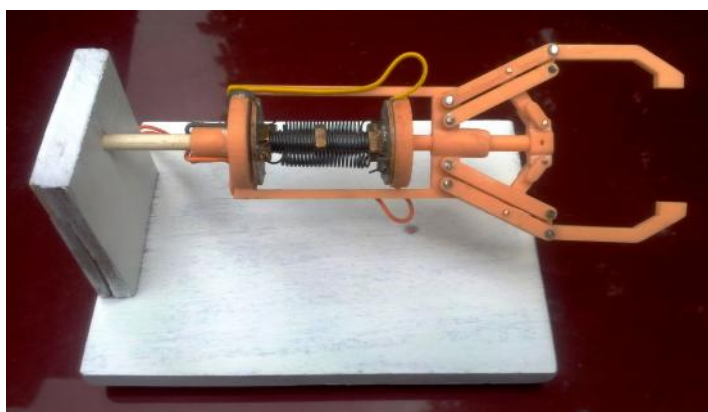


Figura 97. Modelul experimental al prehensorului paralel

În vederea construcției modelului experimental, inițial s-a proiectat și realizat o pereche de circuite electrice menite să asigure fixarea mecanică a arcurilor din Nitinol și în același timp să furnizeze un contact electric optim între circuit și arcuri, în caz contrar existând riscul de a se produce disfuncționalități în timpul deplasării păpușii mobile a actuatorului.

După aceea, s-a procedat la fixarea arcurilor pe cele două plăci de circuit, arcurile de tracțiune fiind fixate mecanic cu șuruburi iar cele de compresiune prin intermediul unor bucle de alamă strunjite pe suprafața interioară (Figura 98).

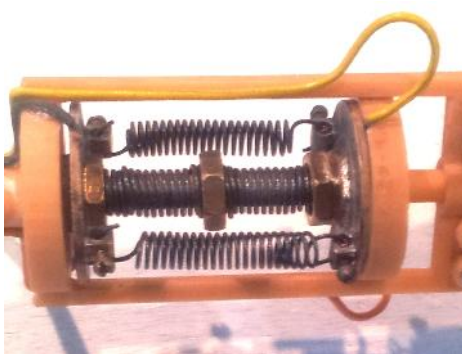


Figura 98. Fixarea elementelor active din Nitinol

S-a procedat apoi la asamblarea celorlalte elemente ale DP, respectiv a elementelor articulate din compența dispozitivului de prehensiune și a efectorilor finali.

Având deja ansamblul DP, s-a procedat apoi la construcția standului experimental propriu-zis. Pentru furnizarea curentului de alimentare a circuitului electric s-a ales o sursă dublă de curent electric Protek DC Power Supply model DF1731SB3A Tri-output cu limitarea variabilă a curentului de sarcină, plajele sursei stabilizate de curent fiind pentru tensiune 0 – 30 V_{cc} și pentru intensitate 0 – 5 A.

Sistemul senzorial al standului experimental pentru măsurarea temperaturii, a deplasării efectuate de elementul motor și al forței de prehensiune dezvoltate este format din:

5.1.1. Senzorul de măsurare a temperaturii

Senzorul utilizat pentru măsurarea temperaturii constă din 2 termocuple pentru măsurarea temperaturii elementelor active din Nitinol tip Omega (Figura 99), fixate de arcurile active cu ajutorul unei paste termo-conductibile furnizate de aceeași firmă Omega, termocuplele având caracteristica liniară de dependență temperatură – rezistență, iar inerție termică aproape inexistentă.



Figura 99. Senzorii de măsurarea temperaturii -Termocuplele Omega

Calibrarea senzorului de temperatură s-a realizat pe baza unei metode comparative, care au utilizat ca etalon valorile termice măsurate cu termometrul în inflaroșu Optris, termometrul oferind posibilitatea înregistrării datelor măsurate atât prin intermediul unei interfețe USB. Interfața asigură afișarea sub formă grafică sau salvarea sub formă tabelară.

Caracteristicile termometrului Optris sunt:

- plaja spectrală 8 - 14 μm ;
- plaja de temperaturii măsurate 35 - 900° C;
- rezoluția 0,1° C;
- rezoluția optică 75:1;
- distanțe de măsurare: apropiată 1 - 62 mm; îndepărtată 62 - 1200 mm;
- timp de răspuns 150 ms;
- acuratețe $\pm 0,75^\circ\text{C}$;
- interfață de comunicare cu unitatea de computer tip USB și afișaj propriu;

5.1.2. *Senzorul de măsurare a deplasării*

Senzorul de măsurare a distanței de deplasare a elementului mobil îl reprezintă un traductor cu laser pentru măsurarea deplasării (TLD), tip LG10A65PU (Figura 100). Acesta are o precizie de minim 10 μm la 100 mm pentru deplasări lente, cum sunt cele din acest caz, și măsoară deplasări care se încadrează între limita minimă de 75 mm și maximă de 125 mm.

Caracteristicile funcționale ale traductorului de deplasare LG10A65PU:

- plaja de măsurare a distanței 75 – 125 mm, cu distanța focală maximă la 180 mm;
- tensiunea de alimentare 12 - 30 Vcc;
- fascicol luminos 650 nm, roșu, laser clasa 2, cu putere radiantă de 0,2 mW;
- rezoluțiile în funcție de viteza de deplasare: rapidă <150 μm , medie <50 μm și rapidă <10 μm ;
- liniaritatea caracteristicii de evoluție a ieșirii analogice $\pm 200\ \mu\text{V} / \text{mm}$.
- histerezisul ieșirii discrete <1 mm;
- indicatoare color cu LED și protecție IP67.



Figura 100. Traductorul cu laser pentru măsurarea deplasării tip LG10A65PU

5.1.3. Senzorul de măsurare a forței

Senzorul de măsurare a forței de prehensiune dezvoltate de efectorii finali ai DP a constat într-un senzor FlexiForce 1-617-464-4500 HT201-H (Figura 101).

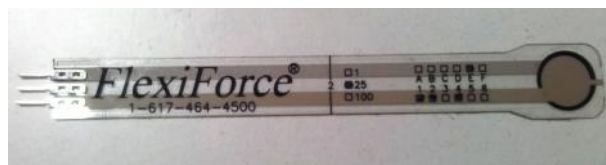


Figura 101. Senzor de forță FlexiForce

Senzorul de măsurare a forței FlexiForce este de fapt un circuit imprimat încastrat între două filme de poliester, foarte subțire și flexibil. Prin forma sa constructivă, senzorul poate măsura forța ce apare între două suprafețe.

Suprafața activă a senzorului este un cerc cu o arie de $9,52 \text{ mm}^2$, gama de măsurare situându-se în intervalul 0-133N pentru modelul HT201-H.

Caracteristicile funcționale:

- intervalul de temperatură $-9^\circ - 60^\circ\text{C}$
- eroarea la repetabilitate $\pm 2,5\%$,
- histerezisul $< 4,5\%$ din întreaga scală de măsurare,
- timpul de răspuns $< 5\mu\text{sec}$

Senzorul este condiționat ca încărcare, o repetare peste 5 ori a unei eventuale suprasarcini de 110% din forța limită admisă conducând la distrugerea lui.

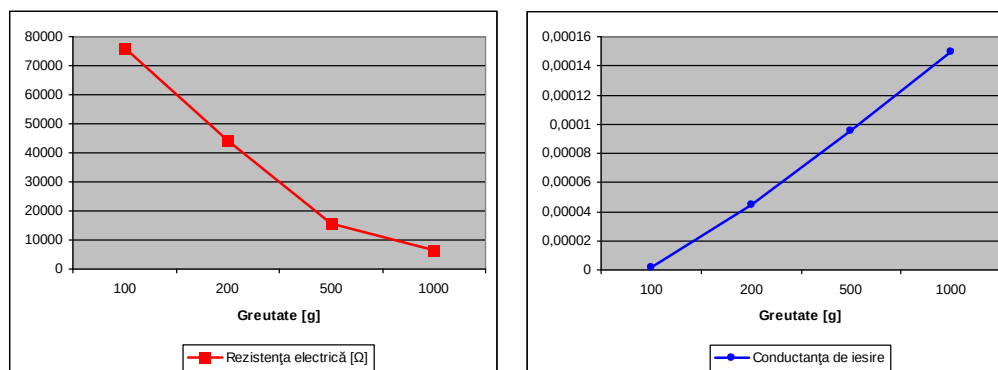


Figura 102. Caracteristica senzorului FlexiForce

Comportarea senzorului FlexiForce are o caracteristică liniară, marja de eroare fiind de $\pm 3\%$ (Figura 102).

În Figura 103 sunt prezentate datele utilizate pentru calibrarea senzorului.

Greutate aplicată [g]	Rezistența electrică [Ω]	Conductanța de ieșire
100	76000	1,31579E-05
200	44500	2,24719E-05
500	15700	6,36943E-05
1000	6700	0,000149254

Figura 103. Datele de calibrare a senzorului FlexiForce

Achiziția datelor transmise de senzori a putut fi realizată prin intermediul CAD - NI USB-6210 (Figura 104), acesta fiind un convertor analog – digital de tip multifuncțional, cu 16 intrări / ieșiri digitale și alte 16 intrări / ieșiri analogice, cu posibilitatea configurării ca intrare sau ieșire digitală a oricăreia dintre ele. Intrările / ieșirile analogice au o rezoluție de 16 biți și o viteză de eșantionare de 250 kSps.



Figura 104. Convertorul Analogic - Digital - NI USB-6210

Corelarea valorii rezistenței înseriate se face de o asemenea manieră încât domeniul de variație la valorile limită să nu depășească domeniului maxim măsurabil de CAD. În acest fel, senzorul inițial este transformat într-un traductor, fiecărei valori a temperaturii sau forței corespunzându-i o anumită valoare de tensiune.

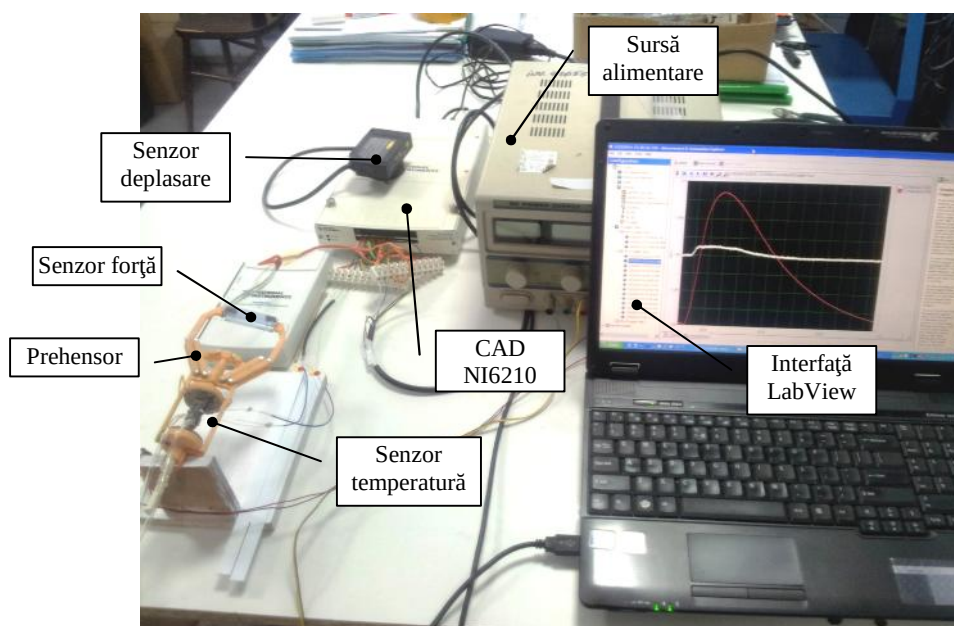


Figura 105. Standul experimental

Prin compararea valorilor de tensiune obținute, cu valori folosite ca etalon determinate prin alte metode de măsurare, se realizează calibrarea senzorului respectiv în cadrul instrumentului virtual.

Trebuie menționat faptul că întregul sistem senzoric cât și sistemul de comandă și control (Figura 105) au fost achiziționate prin *Contractul de finanțare nr. 748/15.01.2009* pentru proiectul *Cercetări privind îmbunătățirea parametrilor de răspuns în timp real al actuatorilor cu elemente active din aliaje cu memoria formei pentru modulele robotice de prehensiune*, proiect finanțat de Consiliul Național al Cercetării Științifice din Învățământul Superior (C.N.C.S.I.S.) prin Programul IDEI - Proiecte de Cercetare Exploratorie.

5.1.4. Alegerea modului de comandă a elementelor active din AMF

Sistemul de control (Figura 106) al actuatorului are la bază efectul Joules, încălzirea elementelor realizându-se ca urmare a parcurgerii acestora de către un curent electric. Valoarea intensității curentului electric, ce va străbate elementul activ din AMF, va crea gradientul de creștere a temperaturii. Trebuie avut în vedere însă faptul că, pentru a putea asigura parametrii optimi necesari pentru prehensiune, curentul electric maxim de activare a elementelor și limita maximă a temperaturii să nu depășească valorile specificate de producător.

În vederea creșterii valorii temperaturii este necesară determinarea dependenței acesteia de intensitatea curentului electric de conducție. Controlul intensității curentului electric a fost realizat cu ajutorul unui model rezistiv de circuit, care a inclus o sursă dublă de energie electrică și elementele adiacente de circuit. Circuitul electric de alimentare a elementelor trebuie să asigure furnizarea unui curent suficient mare, fiind în aceeași timp caracterizat de simplitate și funcționalitate.

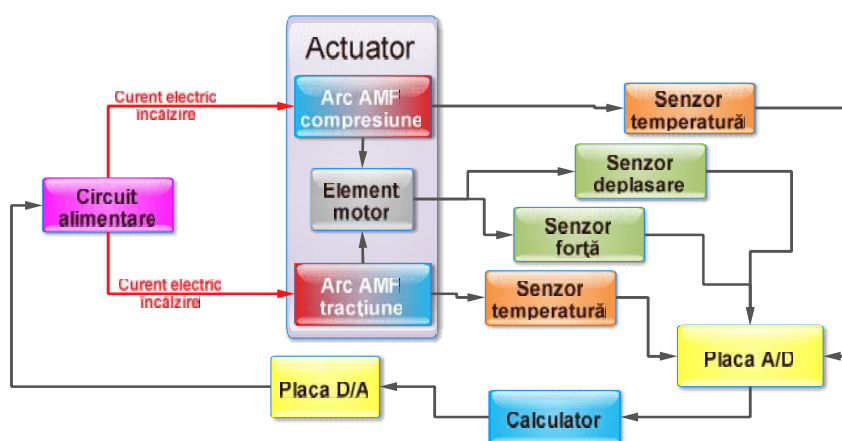


Figura 106. Diagrama bloc a standului experimental

Având în vedere restricțiile privitoare la regimul energetic al DP, controlul elementelor din AMF se poate obține prin implementarea unui model de circuit cu modulația în durată a impulsurilor (Pulse Width Modulation - PWM). Un tip constructiv al unui asemenea circuit este prezentat în Figura 107, propus în literatura de specialitate [16].

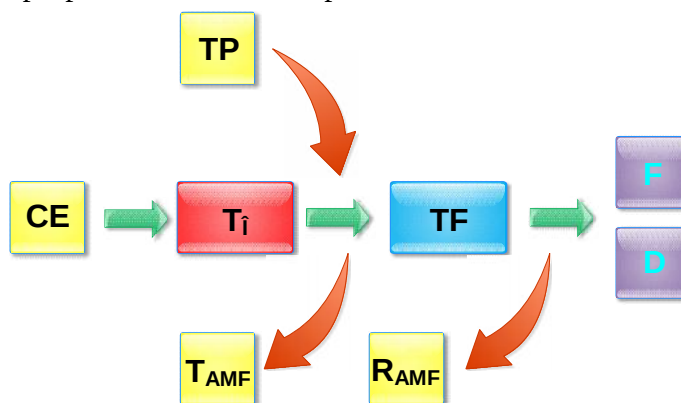


Figura 107. Principiul de funcționare al circuitului de control

Figura 107 prezintă blocurile funcționale ale circuitului de control, în care CE este curentul electric, TF - transformarea de fază, F - forța generată, D - deplasarea efectuată, R_{AMF} - rezistența elementului din AMF și T_{AMF} - temperatura elementului din AMF.

Se pot observa cele patru variable care descriu comportarea AMF, respectiv temperatura, rezistența electrică, forța și deplasarea generată.

În Figura 108 este prezentată diagrama bloc a sistemului de control capabil să satisfacă cerințele acestui stadiu al cercetării, circuit care oferă posibilitatea variației curentului într-o perioadă de timp îndelungată, concomitent cu variația rezistenței funcție de timp. Blocurile structurale ale schemei reprezintă PC - calculatorul, μP - microprocesor, TP - tranzistor de putere, S_T - senzor de temperatură și LR - element de limitare a curentului.

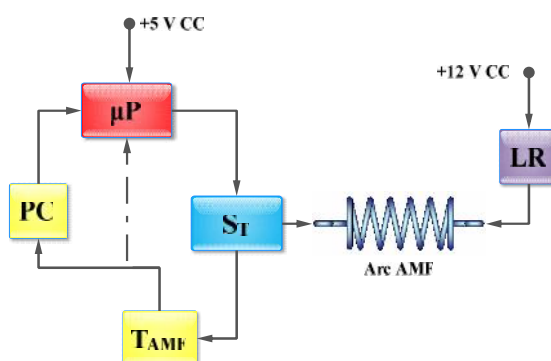


Figura 108. Schema sistemului de control

Implementarea unui sistem de control în curent constant are ca avantaje, față de alte sisteme de control un histerezis redus și o comportare aproximativ liniară. Cu aceste caracteristici este foarte ușor de a evita supraîncălzirea arcurilor din Nitinol. În practică se propune o metodă de control care să coreleze variația rezistenței interne a arcurilor din AMF cu mărimea deplasării pentru implementarea algoritmului de control. De asemenea, e necesar a crea un model de control pentru compensarea histerezisului AMF, care este destul de ridicat. Toate acestea se pot realiza prin anticiparea unei reacții pozitive de compensare a puterii electrice pentru a obține deplasarea dorită a arcurilor din AMF.

În literatura de specialitate sunt descrise diferite tipuri de regulatoare pentru actuatorii din AMF. Regulator clasic PI (proporțional - integrativ), implică evaluarea mărimii controlate printr-un factor de amplificare, care corelează valoarea mărimii de intrare cu cea de ieșire, și constanta de timp de integrare, a cărei implementare conduce la diminuarea sau eliminarea erorii mărimii de ieșire. Considerând acești doi parametri se ajustează proces prin intermediul circuitului electric care înglobează elementul activ din AMF.

Spre deosebire de algoritmul PI, algoritmul PID (proporțional-integrativ-derivativ) se folosește pentru diminuarea constantei de timp principale a procesului, care conduce la creșterea vitezei de răspuns a actuatorului, controlată prin intermediul temperaturii, care la rândul ei, se controlează prin intermediul intensității curentului electric de activare.

Prin setarea celor două componente prezentate anterior în algoritmul PID al regulatorului, se fac testări pentru echilibrarea comportamentală a DP, pentru cele două variante de funcționare, respectiv DP este liber de sarcină sau cu sarcină (Figura 109). Răspunsul regulatorului poate fi astfel setat conform cu eroarea mărimii de ieșire, factorul de amplificare și gradul de instabilitate a

sistemului. Utilizarea regulatorului PID, ca element al algoritmului de control, asigură controlul optim și o stabilitate crescută a sistemului.

Microcontrolerul ATmega8 AVR permite modulația în durată a impulsurilor pe trei canale separate, acesta fiind utilizat doar pentru ajustarea energiei electrice transmise arcurilor din Nitinol. Principiul de operare constă în aplicarea unor impulsuri tranzistorului MOS FET IRFL640xxx utilizat pentru activarea arcurilor, acesta având valorile maxime ale parametrilor de lucru de 17A și 200Vcc.

În vederea asigurării unei funcționări optime a regulatorului implementat cu ajutorul microcontrolerului s-au utilizat un circuit de resetare și un oscilator cu cuarț de 4MHz. Sursele de alimentare, în număr de două, au fost de 12V, respectiv de 5V. Programarea microcontrolerului s-a efectuat cu programatorul STK200, comunicarea cu computerul fiind asigurată prin protocolul RS232.

Tabel 9. Valori de lucru pentru cele două tipuri de arcuri

	Tracțiune	Compresiune
Greutate ridicată [gr]	350	400
Durata dinamică de funcționare [sec]	4,5	5,5
Voltaj [V]	1.8	2.8
Variația curentului electric [A]	1,75 → 2	2,65 → 3
Variația rezistenței electrice [Ω]	1,03 → 0.9	1,07 → 0.9
Deplasarea [mm]	30	35
Tipul variației	hiperbolic	hiperbolic

Rezultatele experimentale (Tabelul 9) au confirmat că arcurile de tracțiune trebuie alimentate timp de 4,5 secunde la 2A pentru a ajunge la temperatura de 52°C, valoarea ulterioară a intensității curentului după cele 4,5 secunde fiind de aproximativ 0,9A pentru a nu depăși pragul de temperatură concomitent cu îndeplinirea condițiilor minime de prehensiune. În timp ce, pentru arcurile de compresiune, după perioada de activare de 5,5 secunde cu un curent de 3A, menținerea la această temperatură se realizează prin reducerea intensității la aproximativ 1,6A.

Utilizarea CAD NI USB-6210 a facilitat achiziționarea datelor în LabView pentru realizarea modelului de achiziție și analiză a datelor. Interfața programului de citire a datelor colectate a fost separată pe trei secțiuni, respectiv Stare Dispozitiv (Device Status), Control în Buclă Închisă (Closed Loop Control) și Răspuns în Buclă Deschisă (Open Loop Response).

Secțiunea referitoare la starea dispozitivului a permis vizualizarea și controlul manual al DP prin varierea caracteristicilor curentului de alimentare al arcurilor din Nitinol, deschiderea și închiderea fluxului de aer utilizat pentru răcirea forțată a arcurilor și filtrarea semnalului la comanda utilizatorului de către blocul funcțional LDT (Large Data Type).

Răspunsul indicial în buclă deschisă al DP permite înregistrarea evoluției tranzitorii a semnalului de ieșire. Se poate determina întârzierea și constanta de timp atât pentru secvența de încălzire cât și pentru cea de răcire a arcurilor după activarea inițială, defininduse astfel caracteristicile temporale de ciclitate a sistemului analizat.

Starea staționară în buclă deschisă permite determinarea valorii comparative a mărimii de intrare cu cea de ieșire, nefiind observată o diferență substanțială a deplasării.

Testul a pornit de la o valoare de referință V_{REF} de 0V, cu pași de 1V, până la 5V. Totodată a fost stabilită și limita maximă a cursei actuatorului.

În final, printr-un traductor implementat la ieșirea sistemului, se realizează modelul de control de tip PID. În această etapă, se determină constantele regulatorului PID, K_P , K_I și K_D , timpul de întârziere al buclei și stocarea într-un fișier. Datele sunt afișate vizual în trei grafice. Interfața LabView a programului este prezentată în Figura 109.

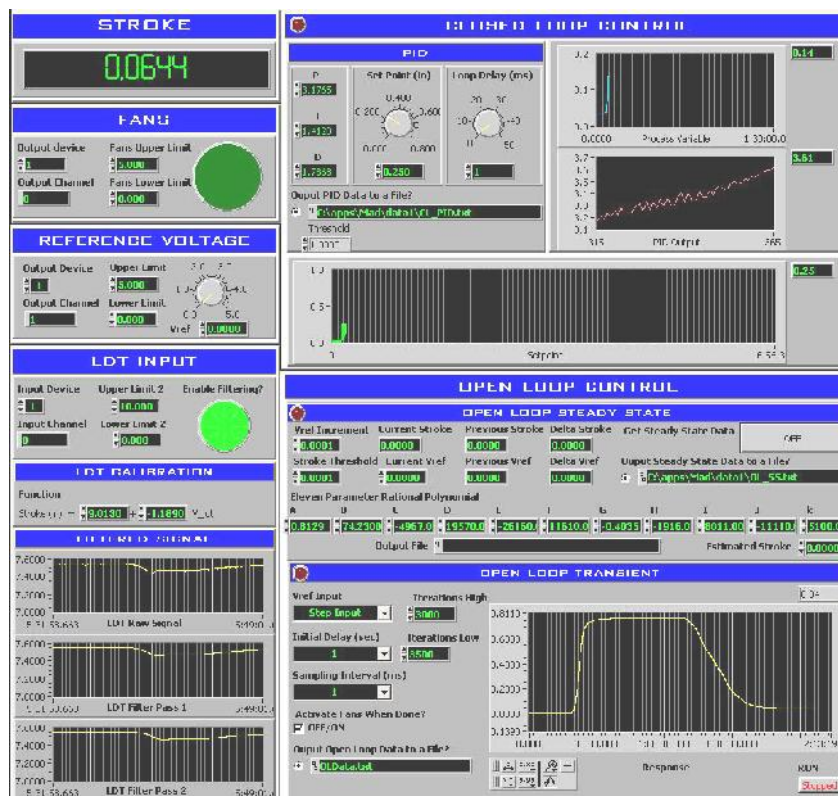


Figura 109. Interfața cu utilizatorul a instrumentului Virtual LabView

5.2. Rezultatele încercărilor experimentale utilizând dispozitivul de prehensiune realizat

Pentru realizarea încercărilor experimentale s-a procedat la fixarea senzorului de măsurare a forței FlexiForce și a unui corp etalon între efectorii DP (Figura 114). Determinările experimentale au urmărit comportamentul DP din punctul de vedere al evoluției valorilor parametrilor determinanți. Sarcina a fost stabilită în două trepte, respectiv 5N și 10N.

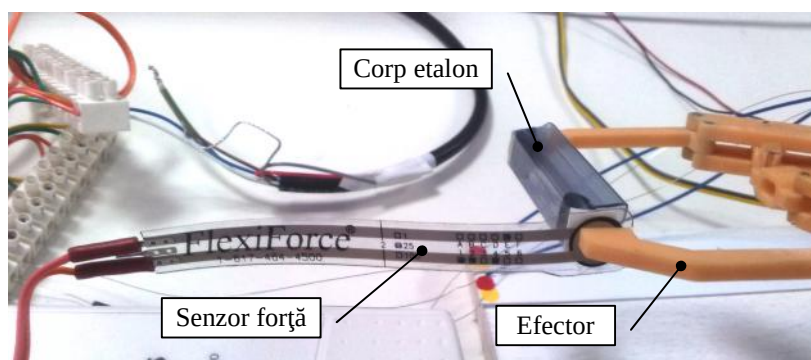


Figura 110. Măsurarea forței de prehensiune (punerea în sarcină a DP)

5.2.1. Răspunsul în buclă deschisă

S-au considerat separat cele două etape de evoluție a răspunsului sistemului în buclă deschisă, respectiv cea tranzitorie și cea staționară/cvasi-staționară. Starea cvasi-staționară se înregistrează la marea majoritate a sistemelor care presupun încălziri/răcirii, manifestându-se sub forma unei oscilații periodice sau aperiodice, în funcție de natura perturbațiilor, în jurul unei valori constante asumată ca fiind starea staționară.

Răspunsul tranzitoriu în buclă deschisă presupune valori evolutive cu o anumită formă a mărimii de ieșire a sistemului, înregistrate între două regimuri staționare, ca urmare aplicării la intrare a unui semnal de tip treaptă. prag al datelor de intrare înregistrând durata de timp și deplasarea. Starea staționară este independentă de timp, putându-se cuantifica limita maximă a valorilor pentru parametri determinanți temperatură, deplasare și forță.

Etapa tranzitorie a răspunsului indicial pentru sistemul în buclă deschisă

Răspunsul DP s-a înregistrat pentru un semnal de tip treaptă cu nivele indicate în Tabelul 9. Datele s-au înregistrat pentru fiecare din cele trei situații de încărcare specificate la începutul subcapitolului 5.2, la care a fost supus DP. S-au efectuat un număr de trei teste pentru fiecare dintre cele trei încărcări pentru a putea calcula răspunsul indicial mediu pentru fiecare dintre acestea. Acest răspuns s-a înregistrat pe toată perioada tranzitorie, determinându-se grafic constanta de timp specifică răspunsului indicial.

Valorile înregistrate ca urmare a răspunsului indicial al sistemului în buclă deschisă, au fost utilizate pentru calibrarea ulterioară a regulatorului PID.

Rezultatele obținute pentru toate cele trei situații de încărcare sunt prezentate în Figura 111.

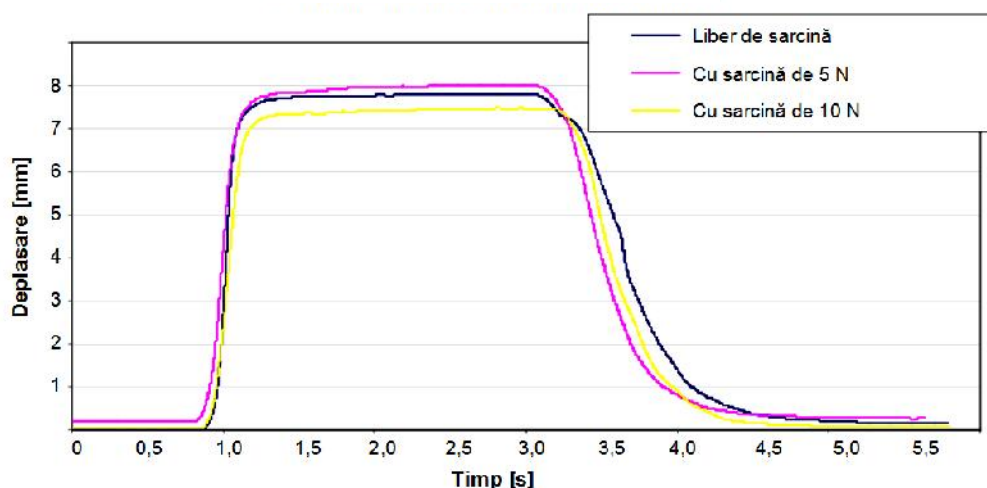


Figura 111. Răspunsul tranzitoriu în buclă deschisă pentru toate cazurile de sarcină

Atât pentru cazul unei încărcări accidentale peste limita superioară determinată experimental, sau la limita maximă de deformare, cât și pentru cazul în care se dorește cunoașterea valorică și comportamentală a evoluției arcurilor din AMF, au fost considerate condiții de testare la limite progresive superioare de încărcare. În aceste cazuri ale supra-încărcării a fost urmărită determinarea gradului de deformare liniară rezultată.

Deplasarea maximă în situația în care DP a fost liber de sarcină a fost de 7,85 mm, pentru sarcini care nu depășesc valoarea de 7N deplasarea fiind aceeași, în timp ce în cazul unor încărcări care depășesc valoarea limită, de exemplu 10N, valoarea a scăzut a scăzut la 6,9 mm. Se observă că răspunsul DP rămâne aproape neschimbat, indiferent de sarcina care este aplicată efectorilor dispozitivului până la valoarea maximă. Acest fapt s-a dovedit ca fiind important ulterior, când s-a procedat la calibrarea controlului în buclă închisă.

Etapă staționară a răspunsului indical pentru sistemul în buclă deschisă

Pentru diferitele valori ale mărimilor de intrare specificate în cadrul subcapitolului 5.1.4 starea staționară a fost atinsă după o perioadă de timp care scade odată cu creșterea valorii mărimii de intrare.

5.2.2. Răspunsul indical în buclă închisă

Răspunsul indical s-a realizat pentru aceleași valori ale mărimii de intrare, în funcție de constantele de timp setate pentru regulatorul PID. Diferitele stări staționare s-au obținut prin ajustarea valorilor parametrilor caracteristici regulatorului PID.

Valorile constantelor de timp (L,T) și forma de evoluție a mărimii de ieșire se determină grafic cu ajutorul Figurii 112.

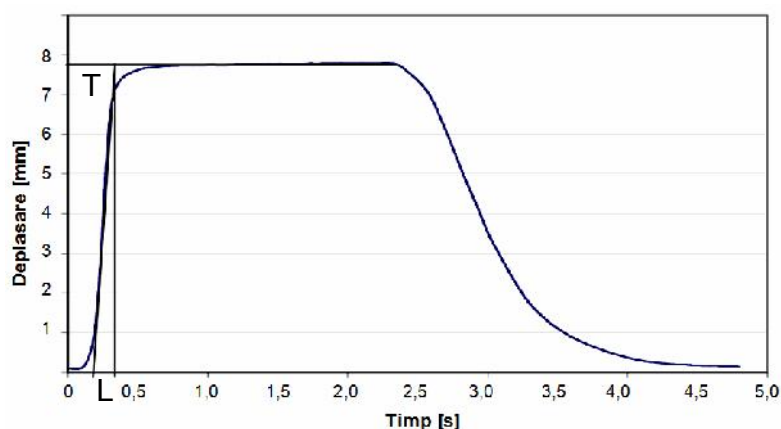


Figura 112. Răspunsul indical al sistemului cu regulator PID pentru situația fără sarcină

Valorile constantelor de timp calculate pentru regulatorul PID s-au calculat cu relația:

$$K_p \approx 1,2 \frac{T}{L}; K_i \approx 0,6 \frac{T}{L^2}; K_d \approx 0,6 \frac{T}{L} \quad 5.1$$

Rezultatele pentru toate cele trei situații de încărcare sunt prezentate în Tabelul 10.

Tabel 10. Rezultatele constantelor de timp pentru situațiile de încărcare

Constanta de timp	Fără sarcină	Cu sarcină de 5N	Cu sarcină de 10N
L	1,125	1,820	1,576
T	2,978	2,132	2,197
K _p	3,1765	1,4057	1,6728
K _i	1,4117	0,3861	0,5307
K _d	1,7868	1,2792	1,3182

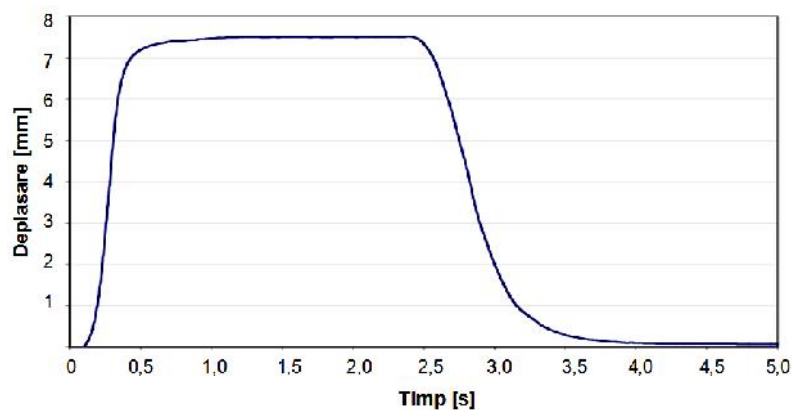


Figura 113. Răspunsul indicial al sistemului cu regulator PID pentru sarcină de 5 N

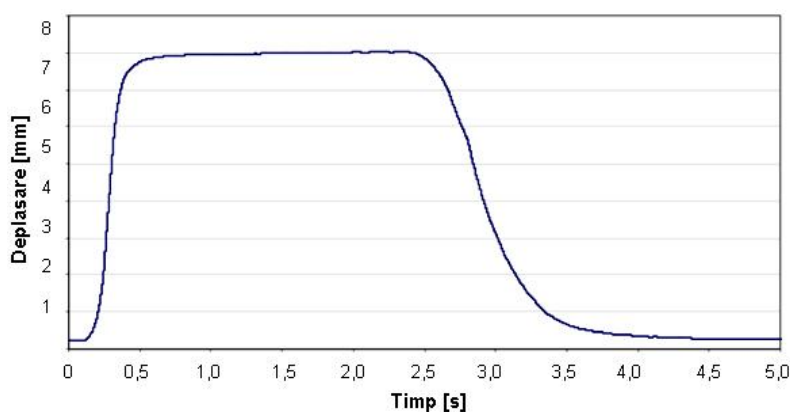


Figura 114. Răspunsul indicial al sistemului cu regulator PID pentru sarcină de 10 N

Bucula închisă s-a realizat prin supravegherea tuturor mărimilor din proces (temperatură, deplasare și forță), figurile de mai sus prezentând doar graficele aferente evoluției deplasării.

Rezultatele obținute în urma determinărilor experimentale sunt sintetizate în Tabelul 11.

Tabel 11. Rezultate experimentale

Încărcare	Deplasare [mm]	Constanta de timp de întârziere [s]	Variație
Liber de sarcină	7,85	1,61	hiperbolic
Cu sarcină de 5N	7,79	1,86	hiperbolic
Cu sarcină de 10N	6,92	2,20	hiperbolic

Constanta de timp de întârziere dintre atingerea valorii temperaturii și realizarea deplasării și a forței maxime este de 1,61 sec fără sarcină și 2,2 sec cu sarcina de 10N.

5.3. Concluzii și contribuții personale

Acest capitolul al lucrării descrie modul de funcționare al DP acționat cu arcuri din AMF, cu accent pe aspectele de detaliu care reflectă comportarea fiecărei mărimi monitorizate implicate în proces. Abordările s-au analizat din punct de vedere calitativ și cantitativ, evidențiindu-se prin aspectele fenomenologice observate, particularitățile relevante care definesc comportamentul DP.

Comanda și controlul arcurilor din Nitinol se bazează pe evoluția valorică a parametrilor considerați (temperatură, forță, deplasare și durată) prin cele trei secțiuni, starea dispozitivului, control în buclă închisă și răspunsul în buclă deschisă, analiza datelor experimentale validând rezultatele obținute prin simulare.

Varianta constructivă de actuator cu două arcuri de tracțiune și două arcuri de compresie s-a dovedit a fi soluția optimă pentru implementarea în componența dispozitivului de prehensiune, evidențiindu-se caracterul dual al arcurilor. Acest comportament dual se manifestă pe o parte când arcurile acționează ca simple resorturi, iar pe de altă parte când sunt încălzite la temperatura de activare și se produce efectul de memorie a formei.

Răspunsul indicial pentru sistemul în buclă deschisă a fost repetabil și precis, atât etapa tranzitorie cât și etapa staționară nu au fost diferite de-a lungul celor trei situații de evoluție. S-au putut cuantifica limitele maxime a valorilor pentru parametri determinanți temperatură, deplasare și forță.

Regulatorul PID a calculat valoarea erorilor variabilelor și a minimizat erorile prin ajustarea parametrilor determinanți.

S-a observat că răspunsul DP rămâne aproape neschimbat, indiferent de sarcina care este aplicată efectorilor dispozitivului până la valoarea maximă de 7N, timpul de răspuns fiind de aproximativ 4 secunde pentru toate cele trei situații de încărcare. Sistemul în buclă deschisă este o soluție ideală pentru implementare în cazul aplicațiilor când sunt necesare valori particularizate ale parametrilor determinanți.

Contribuții personale

Contribuțiile autorului în acest stagiul constau în realizarea standului experimental de testare a dispozitivului de prehensiune, având în vedere toate cerințele care se impun unei activități practice de cercetare științifică.

S-a realizat sistemul senzorial caracteristic pentru achiziția datelor, s-au scalat, etalonat și calibrat senzorii de temperatură, deplasare și forță.

A fost realizat circuitul de comandă și control al DP și s-au efectuat încercările experimentale.

Datele obținute în urma testelor efectuate au fost centralizate, procesate, analizate și prezentate sub formă de tabele și grafice de evoluție.

Informațiile determinate constituie o bază de date importantă pentru cercetări viitoare, iar experiența acumulată poate fi de ajutor viitorilor cercetători care vor dori să continue activitate pe această direcție.

6. CAPITOLUL VI. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. VALORIFICAREA ȘI DISEMINAREA REZULTATELOR

6.1. Concluzii generale

Teza de doctorat prezentată de autor este rezultatul unor cercetări teoretice și experimentale profunde privind construcția și funcționarea unui dispozitiv de prehensiune acționat de elemente din aliaje cu memoria formei, avantajele și dezavantajele acestuia, precum și a domeniilor unde este avantajoasă utilizarea acestuia.

Prin tema sa, teză a propus un model de dispozitiv de prehensiune robotic, acționat de un actuator de concepție novativă realizat pe baza elementelor active din aliaje cu memoria formei, care vizează înlocuirea actuatorilor clasici.

Teza a vizat proiectarea, construcția și validarea funcțională a dispozitivului de prehensiune pe baza ultimelor tendințe tehnologice apărute pe plan național și mondial, tehnologii cu un mare potențial de aplicare pentru realizarea acestor deziderate, urmărindu-se realizarea de cercetări conforme cu ultimele obiective precizate în Platformele Tehnologice Europene și națională prin aspectele abordate ce au vizat acționarea, poziționarea, transferul termomecanic, forța de prehensiune, durata de viață, nevoia de miniaturizare și construcția compactă a actuatorilor.

Acest tip de dispozitiv de prehensiune prezintă interes de implementare în construcția roboților industriali ce acționează în diferite domenii în care se solicită o construcție compactă, masă și gabarit redus, precizie cinematică și forțe de fixare a obiectului de manipulat bine controlate.

Studiul efectuat a permis conceperea soluției constructive și funcționale a dispozitivului de prehensiune acționat de elemente din aliaje cu memoria formei. Astfel, obiectivul principal al tezei a constat în conceperea, proiectarea realizarea și testarea prin simulare și experimentală a modelului stabilit.

Construcția actuatorului cu arcuri din Nitinol a presupus o realizare multi-disciplinară combinând cunoștințe din domeniul mecanicii (proiectarea și realizarea dispozitivului de prehensiune), din domeniul științei materialelor (studiul materialelor inteligente, proiectarea și realizarea arcurilor active din Nitinol) și din domeniul automatizărilor (proiectarea și acționarea sistemului de senzoric de monitorizare și control al actuatorului), fapt ce a presupus un studiu bibliografic amplu și diferențiat.

Informațiile dobândite din studiul bibliografic privitor la diverse modalități de implementare, optimizare și control al elementelor active din AMF au stat la baza percepției complete asupra funcționării aliajelor cu memorie. De aceste aspecte trebuie ținut cont în mod imperativ de-a lungul procesului de proiectare, cel mai important fiind modul de abordare al secvențelor AMF, cea de încălzire și cea de răcire, evidențiindu-se analitic și experimental particularitățile relevante, considerate în diferitele etape de proiectare.

O importanță deosebită s-a acordat principiilor și etapelor dezvoltării unor noi tipuri de actuatori. Metodologia pentru dezvoltarea noilor sisteme s-a bazat pe determinarea valorilor parametrilor dinamici ai elementelor active, parametri determinați analitic și experimental. Încercările experimentale au fost efectuate pe două sau trei elemente, după caz, urmărindu-se constanța rezultatelor înregistrate la repetabilitate. În urma analizei performanțelor materialelor, cele mai bune proprietăți de a fi utilizate le deține Nitinolul, un aliaj ce conține în proporții egale Ni și Ti.

Datorită necesității a mai multor iterații pentru a putea obține varianta optimă din punct de vedere funcțional și a unei durate de viață cât mai mari, s-a realizat o aplicație capabilă să calculeze caracteristicile arcurilor din AMF care poate genera o bază de date de soluții pentru arcurile din AMF utilizabile în diferite aplicații.

Modelarea matematică a efectului de memoria formei și a prehensiunii mecanice, și simularea numerică a funcționării prehensorului, simulare efectuată cu ajutorul unor programe software dedicate (Catia și Solid Works) au servit la testarea ipotezelor privitoare la fenomenele ce pot apare în timpul funcționării dispozitivului de prehensiune. Simularea a contribuit la creșterea capacității de intervenție prin perceperea mai largă a oportunităților și prin clarificarea și evaluarea efectelor unor eventuale acțiuni, oferind posibilitatea construcției modelului pe baza preferințelor și din perspectiva autorului.

Apoi s-a dezvoltat o amplă analiză pentru identificarea mărimilor de stare structurală, cinematică și cinetostatică. Pentru analiza comportării dinamice s-au impus deplasări cu evoluții după funcții cunoscute elementelor din aliaje cu memoria formei pentru a se obține o mișcare controlată.

Cercetările experimentale efectuate în ultima parte a tezei de doctorat au avut în vedere particularitățile relevante care definesc comportamentul DP. S-a urmărit comportarea evolutivă a parametrilor determinanți ai procesului (temperatură, deplasare, forță și timp), pe baza căreia s-a realizat comanda și controlul arcurilor. Răspunsul indicial pentru sistemul în buclă deschisă a fost exact pentru etapa tranzitorie și staționară în cele trei situații de evoluție, fiind cuantificate limitele maxime ale valorilor parametrilor determinanți.

Varianta constructivă de actuator cu două arcuri de tracțiune și două arcuri de compresie din aliaje cu memoria formei s-a dovedit a fi soluția optimă pentru implementarea în componența dispozitivului de prehensiune, evidențiindu-se caracterul dual al arcurilor.

Avantajele oferite de dispozitivul de prehensiune acționat de actuatorul cu elemente active din aliaje cu memoria formei reprezintă construcția compactă, greutate redusă, dezvoltarea unei forțe de acționare mari, a unei deplasări ample, funcționare silențioasă și consum energetic redus.

Ca o concluzie generală a cercetărilor cuprinse în teza de doctorat, se poate afirma că rezultatele obținute dovedesc posibilitatea realizării unui dispozitiv de prehensiune acționat de arcuri active din aliaje cu memoria formei. Performanțele de care este capabil acest sistem îl recomandă pentru aplicații robotice la care siguranța prehensiunii obiectelor este predominantă. Prin urmare, se poate afirma că obiectivul principal al tezei, acela de a propune o nouă soluție constructivă de sistem de prehensiune, a fost îndeplinit.

6.2. Contribuții personale

Originalitatea tezei de doctorat constă în caracterul inovativ al sistemului de prehensiune propus, mai exact al modalității de acționare a acestuia cu arcuri din aliaje cu memoria formei.

Din cercetările teoretice și experimentale prezentate, contribuțiile personale ale autorului constau în:

- modul de cercetare, de selecție și de sintetizare a materialelor bibliografice studiate prin aplicarea unor metode de investigare științifică proprii;
- aplicabilitatea și relevanța celor mai noi rezultate ale cercetărilor în domeniul dispozitivelor de prehensiune și al aliajelor cu memoria formei, precum și structurarea reprezentativă a acestora pe clustere de competență;
- analiza complexă și completă a tipologiilor de dispozitive de prehensiune, dobândirea cât mai multor informații cu privire la comportamentul aliajelor cu memoria formei;
- studiul celor mai recente realizări științifice din domeniul prehensorilor robotici, vizând în mod special actuarii acestora, care au definit aspectele importante privitoare la construcția și funcționarea lor, precizia de poziționare și modul de comandă și control;
- conceperea și prezentarea unei scheme structurale a dispozitivului de prehensiune în urma analizării diferitelor tipuri de dispozitive de prehensiune studiate;
- creșterea performanței actuatorului prin dezvoltarea unei forțe relativ mari concomitent cu o deplasare pe măsură, spre deosebire de actuarii existenți care pot dezvolta o forță mare concomitent cu o deplasare mică sau o forță mai mică și o deplasare relativ mare;
- implementarea unei metodologii ce ușurează calculul de dimensionare a elementelor de tip arc din AMF;
- realizarea schemelor analitice și structurale ale actuatorului și a întregului dispozitiv de prehensiune, având diferite grade de complexitate;
- proiectarea și realizarea modelelor virtuale pentru simularea funcționării variantelor de actuatori concepuți;
- evidențierea structurii și funcționalității distincte și novative al actuatorului propus;
- analiza multicriterială necesară selectării variantei optime de actuator în vederea integrării în construcția dispozitivului de prehensiune;
- analiza comparativă din punct de vedere cinematic a celor două tipuri de dispozitive de prehensiune, paralelă și unghiulară, pentru punerea în evidență a particularităților și similitudinilor existente, analogia dintre acestea fiind pe deplin relevantă în cadrul calculului structural, cinematic și cinetostatic;
- modelarea matematică a fenomenului de memoria formei și a prehensiunii mecanice;
- identificarea mărimilor de stare structurală, cinematică și cinetostatică;
- calculul diferitelor tipuri de contacte mecanice și verificarea condițiilor minime pentru prehensiunea statică;
- stabilirea gradelor de mobilitate ale dispozitivelor de prehensiune și verificarea desmodromiei acestora;
- analiza cinematică atât analitic și prin simulare pentru determinarea orientării elementelor și a vitezelor și accelerațiilor ce apar în timpul funcționării;

- determinarea prin simulare a influenței răcirii forțate a elementelor din aliaje cu memoria formei comparativ cu răcirea naturală (ciclul de funcționare redus cu 2,2 secunde);
- analiza cinetostatică prin simulare a celor două soluții constructive pentru stabilirea forțelor și tensiunilor ce apar în cuplele și elementele corespunzătoare;
- realizarea dispozitivului de prehensiune în varianta paralel acționat de un actuator cu două arcuri de tracțiune și două arcuri de compresiune din aliaje cu memoria formei;
- realizarea standului experimental;
- realizarea sistemului senzorial caracteristic pentru achiziția datelor și circuitul de comandă și control al dispozitivului de prehensiune;
- realizarea interfeței pentru citirea și analiza datelor achiziționate;
- determinarea parametrilor constructiv-funcționali: temperatură, deplasare, forță și durată, presum și interferența dintre aceștia prin determinări experimentale;
- centralizarea, procesarea, analiza și interpretarea rezultatelor experimentale din care rezultă performanțele constructiv funcționale ale dispozitivului de prehensiune acționat de elemente din aliaje cu memoria formei.

6.3. Direcții ulterioare de cercetare

Fiind conștient de faptul că subiectul este departe de a fi epuizat, rezultatele obținute în această lucrare se doresc a fi o contribuție la studiul și optimizarea sistemelor de prehensiune ale roboților industriali și la lărgirea cunoștințelor tehnice în domeniu. Problematika abordată rămâne larg deschisă studiului, rezultatele prezentate în cadrul acestei teze de doctorat putând constitui baza unor viitoare direcții de dezvoltare, ca de exemplu:

- experimentarea unor alte tipologii geometrice pentru dispozitivul de prehensiune;
- utilizarea de incinte controlate pentru evoluția arcurilor, capabile să asigure fluxuri mai dinamice ale fluidului utilizat pentru răcire;
- testarea unor alte fluide utilizate pentru răcire;
- conceperea unor sisteme de comandă complexe pentru dispozitivul de prehensiune
- conceperea unui design miniaturizat pentru sistem
- integrarea actuatorilor în alte aplicații (reducerea vibrațiilor) etc.

Informațiile determinate constituie o bază de date importantă pentru cercetări viitoare, iar experiența acumulată poate fi de ajutor viitorilor cercetători care vor dori să continue activitate pe această direcție.

6.4. Valorificarea și diseminarea rezultatelor

Pentru îndeplinirea scopului tezei și realizarea obiectivelor propuse, în anul 2008 s-a depus în cadrul Programul IDEI - Proiecte de Cercetare Exploratorie din cadrul Planului Național de Cercetare, Dezvoltare și Inovare - P.N.C.D.I II proiectul **„Cercetări privind îmbunătățirea parametrilor de răspuns în timp real al actuatorilor cu elemente active din aliaje cu memoria formei pentru modulele robotice de prehensiune”**, acesta fiind evaluat cu un punctaj de 94,25.

Prin **contractul nr. 748/15.01.2009** finanțat de **Consiliul Național al Cercetării Științifice din Învățământul Superior - C.N.C.S.I.S.** s-a asigurat finanțarea necesară pentru achiziția componentelor ce au asigurat baza materială necesară dezvoltării prehensorului acționat de actuatorul cu elemente active din aliaje cu memoria formei, precum și participarea la conferințe de prestigiu în domeniu în vederea diseminării pe o scară cât mai largă a rezultatelor obținute, rezultate concretizate printr-un număr de **20 de lucrări științifice (18 ca prim autor)**, publicate în jurnale de specialitate și buletine ale conferințelor internaționale și naționale sau publicate în reviste tehnice de specialitate. Dintre acestea, **6 lucrări** au fost **indexate ISI**, restul de **14** fiind indexate **BDI** (Scopus, Google Scholar etc.).

7. BIBLIOGRAFIE

- [1] **Amariei, D.,** Vela I., Ziegler, W., *IMPLEMENT OF SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS IN A ROBOTIC HAND* ", U.E.M. Reșița Annals, Nr. 1/ 2006, pag.15-18, ISSN 1453 – 7394;
- [2] **Amariei, D.,** Vela, I., G. R. Gillich, *THE ORIGIN OF VIBRATION REDEMPTION EFFECT FOR SHAPE MEMORY ALLOYS*, U.E.M. Reșița Annals, Nr. 1/ 2007, pag. 11-14, ISSN 1453 – 7394;
- [3] **Amariei, D.,** Meason, Y., Vela, I., *ANALISYS AND DESIGN OF THERMAL ACTUATORS*, U.E.M. Reșița Annals, Nr. 1/ 2007, pag. 15-18, ISSN 1453 – 7394
- [4] **Amariei, D.,** Vela, I., *SHAPE MEMORY ALLOYS ACTUATORS IN ROBOTIC APPLICATIONS "ROBOTICA & MANAGEMENT"* International Journal, Vol. 12, Nr. 2 / 2007, pag. 67-70, ISSN 1453 – 2069;
- [5] **Amariei, D.,** Gillich, G. R., Frunzăverde, D., Micloșină, C., *STUDY ON THE BEHAVIOR OF NI-TI SHAPE MEMORY ALLOYS IN ORDER TO HIGHLIGHT THE MEMORY EFFECT*, 2008 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics AQTR 2008 - THETA 16th edition - May 22-25 2008 Cluj-Napoca, Romania, pag. 113-119, ISBN 1-4244-2577-8,
- [6] **Amariei, D.,** Vela, I., Gillich, G.-R., Chioncel, C., *DESIGN OF ARTICULATED EFFECTORS FOR GRASPING MODULES*, International Conference COMEFIM '9 2008 - Polytechnic Institute of Iași Bulletin, edited by Technical University "Gheorghe Asachi" of Iași, Tome LIV (LVIII), Fascicule 3 and 4, pag. 113-119; ISSN 1011 – 2855;
- [7] **Amariei, D.,** Vela, I., *DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE SHAPE MEMORY ALLOY ACTIVE ELEMENT TEST-BED*, The 4th International Conference of Robotics ROBOTICA '08 Brașov, 13 - 14 noiembrie, 2008 ROMANIA edited by Transilvania University Press, Vol.1, pag 209-213; ISSN 1223-9631, ISBN 978-973-598-387-1
- [8] **Amariei D.,** Gillich, N., Chioncel, C.P., Bizau, V. & Birdeanu, *ABOUT THE USE OF SHAPE MEMORY ALLOYS IN VIBRATION DAMPING* - Gillich, G.-R.; E.D., The 19th International DAAAM SYMPOSIUM, " Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions ", 22-25th October 2008,Trnava, Slovakia Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium, pp 551-552, ISBN 978-3-901509-68-1, ISSN 1726-9679, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2007, [Indexed to Institute for Scientific Information \(ISI\)](#)
- [9] **Amariei, D.,** Vela, I., Vogeles, T., Pushkin, M., Pascoa Marques, J.C., *CONTRIBUTION OF SHAPE MEMORY ALLOYS ELEMENTS IN DESIGNING UNDERWATER SMART STRUCTURES*, U.E.M. Reșița Annals, Nr. 1/ 2008, pag. 23-28, ISSN 1453 – 7394;
- [10] **Amariei, D.,** Vela, I., Gillich, G.-R., Ianici, S., Raduca, E., Augustinov, L., *MATHEMATICAL MODELLING OF SHAPE MEMORY ALLOY EFFECT*, Proceedings of the 5th International Vilnius Conference and XXII EURO-Mini Conference "Knowledge-Based Technologies and OR methodologies for Strategic Decisions of Sustainable Development" (KORS-D-2009), September 30-October 3, 2009, Vilnius, Lithuania, pag. 477-482, ISBN: 978-9955-28-482-6
- [11] **Amariei, D.,** Gillich, G.-R., Danubianu, M., Florea, G., Baclesanu, D., Radoiu, D., *VIBRATION DAMPING EFFECT OF SHAPE MEMORY ALLOYS APPLIED TO INFRASTRUCTURES* Proceedings of the 5th International Vilnius Conference and XXII EURO-Mini Conference "Knowledge-Based Technologies and OR methodologies for Strategic Decisions of Sustainable Development" (KORS-D-2009), September 30-October 3, 2009, Vilnius, Lithuania, pag. 471-476, ISBN: 978-9955-28-482-6
- [12] **Amariei, D.,** Vela, I., Gillich, G.-R., Raduca, E., *SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATOR FOR ROBOTIC GRIPPERS ACTUATED BY TWO PAIRS OF ACTIVE SPRINGS*, The 20th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM, " Intelligent Manufacturing & Automation: Theory, Practice & Education ", 25-28th November 2009, Viena, Austria, *Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium*, Editor B. Katalinic, [Indexed to Institute for Scientific Information \(ISI\)](#)
- [13] **Amariei, D.,** Gillich, G.-R., Negru, I., *RESEARCHES REGARDING THE EFFECT OF NITINOL VIBRATION DAMPER APPLIED TO INFRASTRUCTURES* ", U.E.M. Reșița Annals, Nr. 1/ 2009, pag. 9-14, ISSN 1453 – 7394, 2009

- [14] **Amariei, D.**, Vela, I., Gillich, G.-R., Augustinov, L., *CONTRIBUTION TO SHAPE MEMORY ALLOYS ACTUATED SYSTEMS DESIGN* ", U.E.M. Reșița Annals, Nr. 1/ 2009, pag. 15-20, ISSN 1453 – 7394, 2009
- [15] **Amariei, D.**, Gillich G. R., Vela I., Negru I., Mitulețu I. C., *RESEARCHES ABOUT STRUCTURES EXPOSED TO VIBRATIONS REINFORCED WITH SHAPE MEMORY ALLOY BRACINGS*, 3rd WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG '10) International Conference on Geography and Geology 2010 (WORLDGEO '10) Corfu Island, Greece, July 22-24, 2010. [Indexed to Institute for Scientific Information \(ISI\)](#)
- [16] **Amariei, D.**, Micloșină O.C., Vela I., Mitulețu I. C., Vela D., *RESEARCHES ABOUT PARAMETERS STABILIZATION FOR LONG-TIME FUNCTIONALITY OF SHAPE MEMORY ALLOY ACTIVE ELEMENTS*, 3rd WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG '10) International Conference on Geography and Geology 2010 (WORLDGEO '10) Corfu Island, Greece, July 22-24, 2010. [Indexed to Institute for Scientific Information \(ISI\)](#)
- [17] **Amariei, D.**, Frunzaverde, D., Vela, I., Gillich, G.-R., *EDUCATIONAL STAND USING SHAPE MEMORY ALLOYS TO ENHANCE TEACHING OF SMART MATERIALS*“ - World Conference on Educational Sciences WCES 2010, 04-08th February 2010, Istambul, Turkey, PROCEDIA SOCIAL AND BEHAVIOURAL SCIENCES, [Indexed to Institute for Scientific Information \(ISI\)](#)
- [18] **Amariei, D.**, Micloșină O.C., Vela I., Tufoi, M., Mitulețu I.C., *CONTRIBUTIONS TO DESIGN OF SYSTEMS ACTUATED BY SHAPE MEMORY ACTIVE ELEMENTS*, International Conference on Control, Automation and Systems Engineering, ICASSE, Venice, pag. 24-26, 2010.
- [19] **Amariei, D.**, Referat - *STAREA ACTUALĂ A CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL MODULELOR DE PREHENSIUNE*, UEM, Școala Doctorală, 2008
- [20] **Amariei, D.**, Referat - *MODELAREA MATEMATICĂ ȘI SIMULAREA NUMERICĂ A MODULELOR DE PREHENSIUNE*, UEM, Școala Doctorală, 2009
- [21] **Amariei, D.**, Referat - *CONSTRUCȚIA ȘI FUNCȚIONAREA ACTUATORILOR ROBOTICI*, UEM, Școala Doctorală, 2009
- [22] Asua E., Etzebarria V., Garcia-Arribas A., *NEURAL NETWORK-BASED MICROPOSITIONING CONTROL OF SMART SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS*, ScienceDirect, Elsevier, Engineering Applications of Artificial Intelligence 21, Pag. 796–804, 2008
- [23] Barbieri, L., Bergamasco, M., *NETS OF TENDONS AND ACTUATORS: AN ANTHROPOMORPHIC MODEL FOR THE ACTUATION SYSTEM OF DEXTEROUS ROBOT HANDS*, Proc. IEEE Intl. Conference on Advanced Robotics, vol. 1, pp. 357 –362, 1991
- [24] Bathe, K.-I. *FINITE – ELEMENTE METHODEN*, Berlin/ Heidelberg/ New York, Springer Verlag, 1986
- [25] Bathe, K.-I., Wilson, F.L., - *NUMERICAL METHODS IN FINITE ELEMENT ANALYSIS* – Prentice – Hall Inc. Engwood, New Jersey, 1976
- [26] Bicchi A., *HANDS FOR DEXTEROUS MANIPULATION AND ROBUST GRASPING: A DIFFICULT ROAD TOWARD SIMPLICITY*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, No.6, December, 2000
- [27] Bizdoaca, N.-G., Petrisor, A., Bizdoaca, E., *CONVENTIONAL CONTROL AND FUZZY CONTROL ALGORITHMS FOR SHAPE MEMORY ALLOY BASED TENDONS ROBOTIC STRUCTURE*, WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL, Issue 2, Volume 3, p. 115-124, 2008
- [28] Bujoreanu L. G., *MATERIALE INTELIGENTE*, Editura „Junimea”, ISBN 973-37-0735-X, Iași, 2002
- [29] Chironis N., *SCLATER NEIL MECHANISMS AND MECHANICAL DEVICES SOURCEBOOK*, ISBN 0-07-146761-0, 2007
- [30] Delaey, L., *MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY 5*, in "Phase Transformations in Materials", ed. P. Haesen, VCH, 339-404, 1991
- [31] Dessault Systems - *SOLIDWORKS 2010 - ASSEMBLY MODELING*, 300 Baker Avenue, Concord, Massachusetts, 01742, USA, 2010
- [32] Dessault Systems - *SOLIDWORKS 2010 - ADVANCED PART MODELING*, 300 Baker Avenue, Concord, Massachusetts, 01742, USA, 2010
- [33] Dessault Systems - *SOLIDWORKS 2010 - MOTION*, 300 Baker Avenue, Concord, Massachusetts, 01742, USA, 2010

- [34] Duerig, T.W., Wayman, C.M., *AN INTRODUCTION TO MARTENSITE AND SHAPE MEMORY, ENGINEERING ASPECTS OF SHAPE MEMORY ALLOYS*, Butterworth-Heinemann Publishers, London, pp. 3-20, 1990
- [35] Enache Al., *MATERIALE COMPOZITE CU MATRICE METALICĂ AVÂND PROPRIETĂȚI DE MEMORIE A FORMEI*, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor, Teză de Doctorat, 2012
- [36] Faur, N., Dumitru, I., *DIFERENȚE FINITE ȘI ELEMENTE FINITE*, Editura Mirton, Timișoara, 1997
- [37] Faur, N., *ELEMENTE FINITE*. Editura Politehnică, Timișoara, 2007
- [38] Feng Z.C. & Li, D.Z., *DYNAMICS OF A MECHANICAL SYSTEM WITH A SHAPE MEMORY ALLOY BAR*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 7(4), July 1996, pp. 399–410, ISSN 1530-8138, 1996
- [39] Furman, B.J. and G.P. Hayward, *ASYNCHRONOUS HANDS-ON EXPERIMENT FOR MECHATRONICS EDUCATION*, Mechatronics, Vol. 12, pp. 251-260, 2002
- [40] Funakubo, H., ed. translated from Japanese by J.B. Kennedy, *SHAPE MEMORY ALLOYS*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, Holland, 1987
- [41] Gedouin P. A., Delaleau E., Bourgeot J. M., Join C., Chirani S. A., Calloch S., *EXPERIMENTAL COMPARISON OF CLASSICAL PID AND MODEL-FREE CONTROL: POSITION CONTROL OF A SHAPE MEMORY ALLOY ACTIVE SPRING*, Control Engineering Practice 19, Pag. 433–441, 2011
- [42] Gibbs, W.W., *SMART MATERIALS*, Scientific American, May 5, 1996
- [43] Gillich G.R., Bratu P., Frunzăverde D., **Amariei D.**, Iancu V., *IDENTIFYING MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS WITH NON-LINEAR BEHAVIOR USING STATISTICAL METHODS*, Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Computer engineering and applications, 2010.
- [44] Gillich, G.-R., Chioncel, C.P., Iancu, V., **Amariei, D.**, Jurcau C.S., *BASE ISOLATION FOR STATIONARY ROBOTS, “ROBOTICA & MANAGEMENT” International Journal*, Vol. 13, Nr. 2 / 2008 , pag. 67-70, ISSN 1453 – 2069; 2008
- [45] Gillich, G.-R., Frunzaverde, D., Gillich, N., **Amariei D.**, *THE USE OF VIRTUAL INSTRUMENTS IN ENGINEERING EDUCATION “ - World Conference on Educational Sciences WCES 2010, 04-08th February 2010, Istanbul, Turkey, PROCDIA SOCIAL AND BEHAVIOURAL SCIENCES, [Indexed to Institute for Scientific Information \(ISI\)](#)*
- [46] Gilbertson, R.,G., *MUSCLE WIRES PROJECT BOOK*, Mondo Tronics, CA, 2000
- [47] Goldfarb J M., Celanovic N., *A FLEXURE-BASED GRIPPER FOR SMALL-SCALE MANIPULATION*, Robotica, Volume 17, 1999
- [48] Ham Van, R., Sugar, T.G.,Vanderborght, B., Hollander, K. W., Lefeber D.– *COMPLIANT ACTUATOR DESIGNS*, IEEE Robotics & Automation Magazine, September 2009
- [49] Harris, C., Jr., Rutledge, G.L., *THE FUNCTIONAL ANATOMY OF THE EXTENSOR MECHANISM OF THE FINGER*, Journal of Bone Joint Surgery, vol. 54A, no. 4, Pag. 713-726, 1972
- [50] Hesse, S. - *GRIPPERS AND THEIR APPLICATIONS*, Blue Digest on Automation. © 2000 by Festo AG & Co., 2004
- [51] Hodgson. D. E., *USING SHAPE MEMORY ALLOYS*, Shape Memory Applications, Inc, 1988
- [52] Howell, L.L., *COMPLIANT MECHANISMS*, John Wiley & Sons, 2001
- [53] Howell, L.L, Midha A., *A METHOD FOR THE DESIGN OF COMPLIANT MECHANISMS WITH SMALL-LENGTH FLEXURAL PIVOTS*, ASME Journal of Mechanical Design 116(1), Pag. 280-290, 1994
- [54] Huang S., Leary M., Ataalla T., Probst K., Subic A., *OPTIMISATION OF NI-TI SHAPE MEMORY ALLOY RESPONSE TIME BY TRANSIENT HEAT TRANSFER ANALYSIS*, ScienceDirect, Materials and Design 35, Pag. 655–663, 2012
- [55] Inoue, T., Hirai, S., *MECHANICS AND CONTROL OF SOFT-FINGERED MANIPULATION*, Springer, ISBN: 978-1-84800-980-6, 2009
- [56] Jan, V.H., *NON-MEDICAL APPLICATIONS OF SHAPE MEMORY ALLOYS*, Materials Science and Engineering A, ISBN 273-275:134-148, 1999
- [57] Jani J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A., *A REVIEW OF SHAPE MEMORY ALLOY RESEARCH, APPLICATIONS AND OPPORTUNITIES*, ScienceDirect, Materials and Design 56, Pag. 1078–1113, 2014

- [58] Kim, B., and Sunghak L., Jong H-P., *DESIGN AND FABRICATION OF A LOCOMOTIVE MECHANISM FOR CAPSULE-TYPE ENDOSCOPES USING SHAPE MEMORY ALLOYS (SMAS)*, IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, Vol. 10, No. 1, pp. 77-86, 2005
- [59] Kim, W.C., Jung-Huun K., Minho L., Jung-Kyoo S., and Hiroo, Y., *BIOLOGICALLY MOTIVATED ACTIVE VISION SYSTEM USING ARTIFICIAL RETINA CHIP AND SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATOR*, Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing, Vol. 3, pp. 1305-1309, 2002
- [60] Kovacs, V.F., *MANIPULATOARE, ROBOȚI ȘI APLICAȚIILE LOR INDUSTRIALE*, Ed. Facla, Timișoara, 1982
- [61] Lagoudas, D.C., *SHAPE MEMORY ALLOYS - MODELING AND ENGINEERING APPLICATIONS*, Springer, ISBN: 978-0-387-47684-1, 2008
- [62] Lashlee, R., Butler, R., Rao,V., Kern, F., *ROBUST CONTROL OF FLEXIBLE STRUCTURES USING MULTIPLE SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS*, The First IEEE Regional Conference on Aerospace Control Systems Proceedings, pp. 708-804, 1993
- [63] Langelaar M., Keulen F., *MODELING OF SHAPE MEMORY ALLOY SHELLS FOR DESIGN OPTIMIZATION*, ScienceDirect, Elsevier, Computers and Structures 86, Pag. 955–963, 2008
- [64] Leary M., Schiavone F., Subic A., *LAGGING FOR CONTROL OF SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATOR RESPONSE TIME*, Technical Report, ScienceDirect, Materials and Design 31, Pag. 2124–2128, 2010
- [65] Lombard M., *SOLIDWORKS 2010 BIBLE*, Wiley Publishing Inc., Indianapolis, Indiana, ISBN 978-0-470-55481-4, SUA, 2010
- [66] Lungu I., *CERCETĂRI PRIVIND DEZVOLTAREA ACTUATORILOR LINIARI ȘI ROTATIVI PE BAZĂ DE ALIAJE CU MEMORIA FORMEI, CU APLICAȚII ÎN SISTEMLILE DE TIP MICROFABRICĂ*, Teză de Doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Mecanică, 2010
- [67] Ma,N., Song, C., *CONTROL OF SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATOR USING PULSE WIDTH MODULATION*, Smart Materials & Structures 12 712, 2003
- [68] Matsuoka, Y., *THE MECHANISMS IN A HUMANOID ROBOT HAND*, Autonomous Robots, vol. 4, no. 2, Pag.199-209, 1997
- [69] Mănescu T. Șt., Nedelcu D., *ANALIZA STRUCTURALĂ PRIN METODA ELEMENTULUI FINIT*, Editura Orizonturi Universitare, ISBN 973-638-217-6, Timișoara, 2005
- [70] Melchiorri C., Vassura G., *IMPLEMENTATION OF WHOLE HAND MANIPULATION CAPABILITY IN THE U.B. HAND SYSTEM DESIGN*, Journal of Advanced Robotics, Vol. 9, No. 5, 1995
- [71] Micloșină, C.-O., Vela, I., Gillich, G.-R., **Amariei, D.**, & Vela, D., *ON THE USE OF ROBOTIC GRIPPERS WITH SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS IN HANDLING LIGHT-WEIGHT WORKPIECES*, The 18th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM, "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Creativity, Responsibility and Ethics of Engineers", 24-27th October 2007, Annals of DAAAM for 2007 & Proceedings of the 18th International DAAAM Symposium, pag. 451-452, ISBN 3-901509-58-5, ISSN 1726-9679, pp 229, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2007, [Indexed to Institute for Scientific Information \(ISI\)](#)
- [72] Micloșină, C.-O., *CONTRIBUȚII LA ANALIZA ȘI SINTEZA MECANISMELOR ROBOȚILOR CU TOPOLOGIE PARALELĂ, UTILIZÂND NOȚIUNEA DE CONEXIUNE*, Teză de doctorat, Timișoara, 2006
- [73] Ming H. W., Schetky L. McD., *INDUSTRIAL APPLICATIONS FOR SHAPE MEMORY ALLOYS*, Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California, Pag. 171-182, 2000
- [74] Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R., Schunk,H.- *ROBOT GRIPPERS*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN: 978-3-527-40619-7, 2007
- [75] Nedelcu, D., *PROIECTARE ȘI SIMULARE NUMERICA CU SOLIDWORKS*, Editura Eurostampa, Timisoara, ISBN 978-606-569-276-3, 2011
- [76] Nedelcu D., *STRESS ANALYSE OF AN ADMISSION VALVE WITH FINITE ELEMENT METHOD*, Analele Universitatii „Eftimie Murgu”, Resita, Fascicola 1, Facultatea de Inginerie, 2007
- [77] Nespoli A., Besseghini S., Pittaccio S., Villa E., Viscuso S., *THE HIGH POTENTIAL OF SHAPE MEMORY ALLOYS IN DEVELOPING MINIATURE MECHANICAL DEVICES: A REVIEW ON SHAPE MEMORY ALLOY MINI-ACTUATORS*, ScienceDirect, Sensors and Actuators A 158, Pag. 149–160, 2010

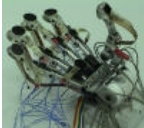
- [78] Oden, I.I., Reedy, I.N., - *AN INTRODUCTION IN TO MATHEMATICAL THEORY OF FINITE ELEMENTS*, Wiley-Interscience N.Y., 1982
- [79] Perkins, J., Hodgson, D., *THE TWO WAY SHAPE MEMORY EFFECT*, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann Publishers, London, pp. 195-206, 1990
- [80] Reddy, I.N., *AN INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD*, Mc Graw Hill, Inc 1993
- [81] Reynaerts, D., Van Brussel, H., *DESIGN ASPECTS OF SHAPE MEMORY ACTUATORS*, Mechatronics, No. 8, pp. 635-656, 1998
- [82] Salisbury, J.K., Craig, J.J., *ARTICULATED HANDS: FORCE CONTROL AND KINEMATIC ISSUES*, IJRR, vol. 1, no.1, 1982
- [83] Schiedeck F., Mojrzisch S., *FREQUENCY-DOMAIN CONTROL DESIGN FOR SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS*, ScienceDirect, Elsevier, Sensors and Actuators A 169, Pag. 133– 140, 2011
- [84] Schiller E. H., *HEAT ENGINE DRIVEN BY SHAPE MEMORY ALLOYS: PROTOTYPING AND DESIGN, MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING*, Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002
- [85] Schroeder B., Boller Ch., *COMPARATIVE ASSESSMENT OF MODELS FOR DESCRIBING THE CONSTITUTIVE BEHAVIOUR OF SHAPE MEMORY ALLOY*, Smart Materials and Structures, 1998
- [86] Sharma S. V., Nayak M. M., Dinesh N. S., *SHAPE MEMORY ALLOY BASED MOTOR*, Sadhana, India, Vol. 33, Part 5, Pag. 699–712, 2008
- [87] Solc, F., Vasina, M., *MODELING AND CONTROL OF SMA ACTUATOR*, Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Electronics, Control and Signal Processing (ICECS '04), October 24-26, Crete, Greece, 2004
- [88] Starețu, I. – *SISTEME DE PREHENSIUNE*, Editura Lux Libris Brașov, 2010
- [89] Stanciu, S., *MATERIALE CU MEMORIA FORMEI : METODE DE INVESTIGAȚIE ȘI APLICAȚII ÎN TEHNICĂ*, Ed. Universitas XXI, ISBN 978-606-538-004-2, Iași, 2009
- [90] Stalmans, R. *ADAPTIVE HYBRID COMPOSITES WITH A FOCUS ON THE INTEGRATION OF SHAPE MEMORY ELEMENTS*, Institut de Génie Atomique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne Switzerland, ADAPT project Report, funded by the European Commission, in the Industrial and Materials Technologies research and technological programme, 2001
- [91] Stöckel, D., *INTRODUCTION ON NEW ACTUATORS*, Actuator, Bremen, 79-84, 1992
- [92] Taghirad H. D., Khosravi M. A., *STABILITY ANALYSIS AND ROBUST COMPOSITE CONTROLLER SYNTHESIS FOR FLEXIBLE JOINT ROBOTS*, Advanced Robotics, vol. 20, NO. 2, Pag. 181-211, 2006
- [93] Tufoi, M., **Amariei, D.**, *DRIVEN SYSTEMS WITH ACTIVE SHAPE MEMORY ALLOY IN THE CONSTRUCTION OF INDUSTRIAL ROBOTS*, Robotica & Management, 17-2 / 2012, Pag. 46-52, 2012
- [94] Ugural, A.C., Fenster, S.K., *ADVANCED STRENGTH AND APPLIED ELASTICITY*, Elsevier, 1987
- [95] Vasina, M., Solc, F., and Hoder, K., *SHAPE MEMORY ALLOYS - UNCONVENTIONAL ACTUATORS*, 2003, IEEE International Conference on Industrial Technology, Vol. 1, pp. 190-193, December 10-12, 2003
- [96] Vela, I., *PROIECTAREA DISPOZITIVELOR*, Vol. I, ISBN 973 - 98496 - 5 - 2, Editura „Eftimie Murgu” Reșița, 1998.
- [97] Vela, I., Micloșină, C.-O., Vela, D., **Amariei, D.**, Cojocaru, V., Bizau, V., *ACTIVITIES IN ROBOTICS DOMAIN AT „EFTIMIE MURGU” UNIVERSITY OF RESITA*, “ROBOTICA & MANAGEMENT” International Journal, Vol. 14, Nr. 2 / 2009 , pag. 33-36, ISSN 1453 – 2069;
- [98] Wait, R., Mitchell, A.R., *FINITE ELEMENTS ANALYSIS AND APPLICATIONS*, John Wiley, N.Y.1985.
- [99] Wakjira J., *The VT1 SHAPE MEMORY ALLOY HEAT ENGINE DESIGN, MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING*, Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001
- [100] Wang, J.H.; Xu, F.; Yan, S.Z; & Wen, S.Z., *ELECTROTHERMAL DRIVING MECHANISM FOR SMA SPRING ACTUATORS*, Materials Science Forum, 423-424; 461-465, 2003
- [101] Waram, T.C., *DESIGN PRINCIPLES FOR NI-TI ACTUATORS, ENGINEERING ASPECTS OF SHAPE MEMORY ALLOYS*, Butterworth-Heinemann Publishers, London, pp. 234-244, 1990

- [102] Waram, T.C., 2nd Edition, *ACTUATOR DESIGN USING SHAPE MEMORY ALLOYS*, Hamilton, Ontario, 1993
- [103] Yao-Jen Lai, Long-Jyi Yeh, Min-Chie Chiu, *AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SHAPE MEMORY ALLOY DYNAMIC SPLINT FOR A FINGER JOINT APPLICATION*, ScienceDirect, Elsevier, Sensors and Actuators A 173, Pag. 210– 218, 2012
- [104] Zhang L.-x., Hu G.-x., *TRANSIENT THERMAL RESPONSE OF SMA ACTUATOR UNDER GAS-JET IMPINGEMENT*, ScienceDirect, Elsevier, Sensors and Actuators A 133, Pag. 152–160, 2007
- [105] Hung, W., *SHAPE MEMORY ALLOYS AND THEIR APPLICATION TO ACTUATORS FOR DEPLOYABLE STRUCTURES*, PhD Dissertation, University of Cambridge, 1998
- [106] *** *GUINNESS WORLD RECORDS 2000: MILLENNIUM EDITION* (Guinness Book of Records) Hardcover – September, 1999
- [107] *** http://archive.org/stream/exploringlivingu00unit/exploringlivingu00unit_djvu.txt
- [108] *** <http://blog.robotiq.com/bid/52340/Barrett-Hand-vs-Robotiq-Adaptive-Gripper>
- [109] *** <http://cs.stanford.edu/people/ang/?portfolio=stair-stanford-artificial-intelligence-robot>
- [110] *** http://de.wikipedia.org/wiki/Mathematisches_Modell
- [111] *** <http://de.wikipedia.org/wiki/Computersimulation>
- [112] *** <http://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode>
- [113] *** http://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Asimov
- [114] *** http://en.wikipedia.org/wiki/Karel_%C4%8Capek
- [115] *** http://en.wikipedia.org/wiki/George_Devol
- [116] *** http://en.wikipedia.org/wiki/John_Thomas_Sladek
- [117] *** http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_Universal_Machine_for_Assembly
- [118] *** http://en.wikipedia.org/wiki/Robots_and_Empire
- [119] *** http://en.wikipedia.org/wiki/Osamu_Tezuka
- [120] *** http://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Mackworth
- [121] *** http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Engelberger
- [122] *** http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_titanium
- [123] *** <http://infolab.stanford.edu/pub/voy/museum/pictures/display/1-Robot.htm>
- [124] *** <http://pages.cs.wisc.edu/~jgast/cs540/slides/25Robotics/sld006.htm>
- [125] *** <http://pixshark.com/leonardo-da-vinci-robot.htm>
- [126] *** http://spinoff.nasa.gov/Spinoff2008/hm_1.html
- [127] *** <http://www.barrett.com/robot/index.htm/>
- [128] *** <http://www.cimwareukandusa.com/RobotPoseTest.htm>
- [129] *** <http://www.icomat2014.com>
- [130] *** <http://www.machineto.com>
- [131] *** <http://www.physikinstrumente.com/products/integrated-piezo-actuators.html>
- [132] *** <http://www.shadowrobot.com/>
- [133] *** <https://www.vrealities.com/products/data-gloves/shadow-dexterous-hand>

8. ANEXE

Anexa 1. Tabel prehensori robotici

Tabel 1. Măini robotice studiate

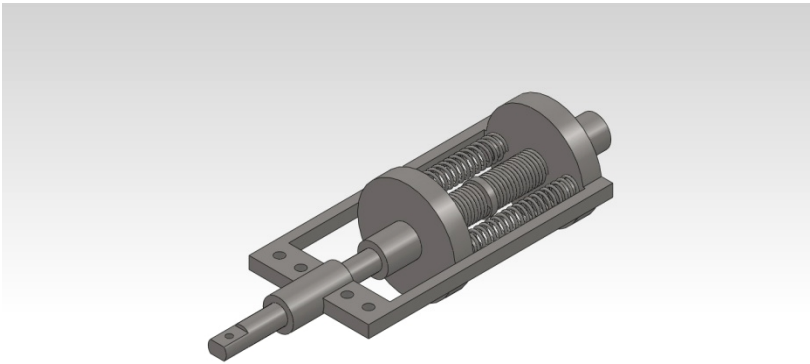
Nr. crt.	Denumire	Design	Producător
1	Smart Motor Hand (C6M)		Shadow Robot Company Ltd.
2	EH1 Milano Hand		Prensilia Srl
3	Actuated Sheffield Hand		Elumotion Ltd.
4	Elu-2 Hand		Elumotion Ltd.
5	DLR Light Weight Robot(LWR)		The Institute of Robotics and Mechatronics
6	Robonaut Arm		NASA
7	Robonaut Hand		NASA
8	Dexhand		SURABAYA UNIVERSITY, Electrical Engineering Department
9	Touch EMAS Arm		Edinburgh Modular Arm System, EMAS
10	Lara Hand		Technical University Darmstadt
11	Yokoi Hand		Artificial Intelligence Laboratory, University of Zurich

12	Delft Hand		TU Delft University of Technology
13	Delft Arm		TU Delft University of Technology
14	H2 Hand		Meka Robotics LLC
15	Harada Hand		California Institute of Technology
16	RAPHaEL Hand		Robotics and Mechanisms Laboratory at Virginia Tech
17	MechaTE Hand		Custom Entertainment Solutions
18	DART Hand		Virginia State Polytechnic Institute, US
19	MAC-HAND		Mechatronics and Automatic Control LABoratory (MACLAB)
20	Dextrous Hand (C5M)		Shadow Robot Company Ltd.
21	Ng Hand		Fully assembled 13 DOF robotic hand/arm kit
22	BIONIC HAND		Hosoda Laboratory
23	OpenArm v.2.0		Stanford University
24	Sheffield Hand		Sheffield Hallam University

25	Gifu Hand III		Dainichi Company, Ltd. Kani, Japan, Kawasaki & Mouri Lab
26	SKKU Hand III		Intelligent Robotics & Mechanic System Lab.
27	IH1 Azzurra Hand		Prensilia Srl
28	Hand-Arm System		Institute of Robotics and Mechatronics
29	Elu-2 Arm		Elumotion Ltd.
30	Modular robotic arm		Robotnik, Valencia
31	Kinova Jaco Arm		Kinova
32	ADAPTIVE GRIPPER		Robotiq, Canada
33	K-1207i		Robotics Research Corporation
34	DIST-Hand		Genoa Robotics And Automation Laboratory (GRAAL)
35	Sandia Hand (2012)		Sandia National Laboratories
36	OCU-Hand		Osaka City University

37	MiyazakiLab Hand		Miyazaki Laboratory
38	Handroid Hand		ITK Co.ltd.

Anexa.2 Raport simulare SolidWorks actuator cu două arcuri de tracțiune



Description
No Data

Simulare Actuator- Doua arcuri

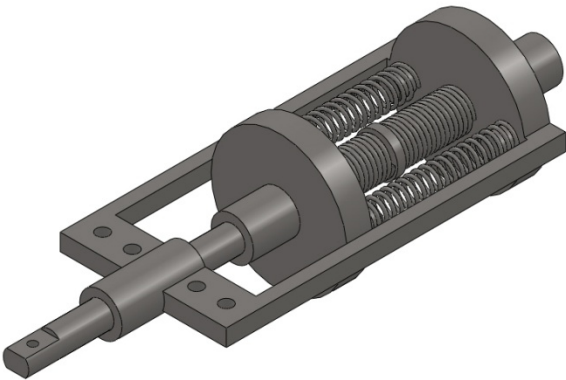
Date: 21 decembrie 2011
Designer: Solidworks
Study name: Actuator 2 arcuri tractiune
Analysis type: Static

Table of Contents

Description..... 1
Assumptions 2
Model Information 2
Study Properties 3
Units 3
Material Properties 4
Loads and Fixtures.....4
Connector Definitions.....5
Contact Information.....5
Mesh Information 6
Sensor Details 7
Resultant Forces 7
Beams.....7
Study Results 8
Conclusion 11

Assumptions

Model Information



Model name: Actuator - Doua Arcuri
Current Configuration: Default

Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Combine1 	Solid Body	Mass:0.322468 lb Volume:1.1592 in^3 Density:0.27818 lb/in^3 Weight:0.322249 lbf	D:\12_NOV_2011\Dan\Actuator-Doua Arcuri.SLDPRT Dec 21 22:49:16 2011

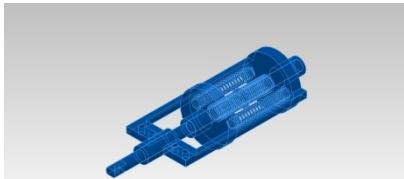
Study Properties

Study name	Study 1
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off
Solver type	Direct sparse solver
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	On
Compute free body forces	Off
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SolidWorks document (D:\12_NOV_2010\Dan - Actuator - Doua Arcuri)

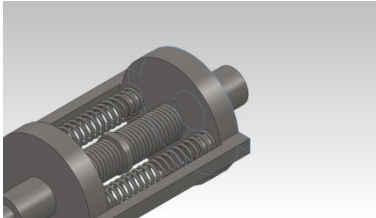
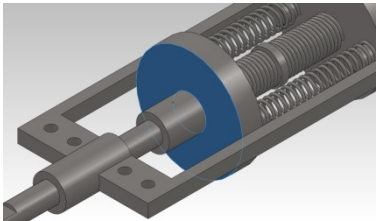
Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m ²

Material Properties

Model Reference	Properties		Components
	Name:	Alloy Steel	SolidBody 1(Combine1) (Actuator-Doua Arcuri)
	Model type:	Linear Elastic Isotropic	
	Default failure criterion:	Max von Mises Stress	
	Yield strength:	6.20422e+008 N/m^2	
	Tensile strength:	7.23826e+008 N/m^2	
	Elastic modulus:	2.1e+011 N/m^2	
	Poisson's ratio:	0.28	
	Mass density:	7700 kg/m^3	
	Shear modulus:	7.9e+010 N/m^2	
	Thermal expansion coefficient:	1.3e-005 /Kelvin	
Curve Data:N/A			

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		Entities: 1 face(s) Type: Fixed Geometry		
On Flat Faces-1		Entities: 1 face(s) Type: On Flat Faces Translation: ---, ---, 15 Units: mm		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	0	0	109.552	109.552
Reaction Moment(N-m)	0	0	0	0

Connector Definitions

No Data

Contact Information

No Data



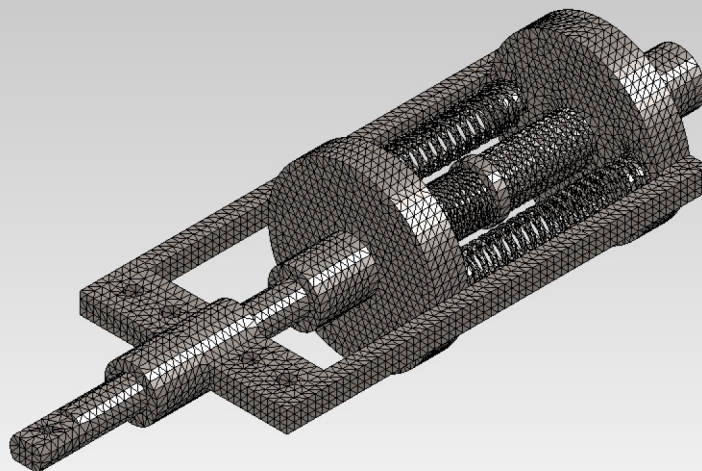
Mesh Information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Maximum element size	0 mm
Minimum element size	0 mm
Mesh Quality	Draft Quality Mesh

Mesh Information - Details

Total Nodes	22741
Total Elements	78167
Maximum Aspect Ratio	133.67
% of elements with Aspect Ratio < 3	87.4
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.242
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:04:28
Computer name:	TOSHIBA-CARDT

Model name: Actuator-Cadru_Lip11
Study name: Study 1
Mesh type: Solid mesh



Sensor Details

No Data

Resultant Forces

Reaction Forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	-5.66244e-007	-1.63168e-006	0.0103221	0.0103221

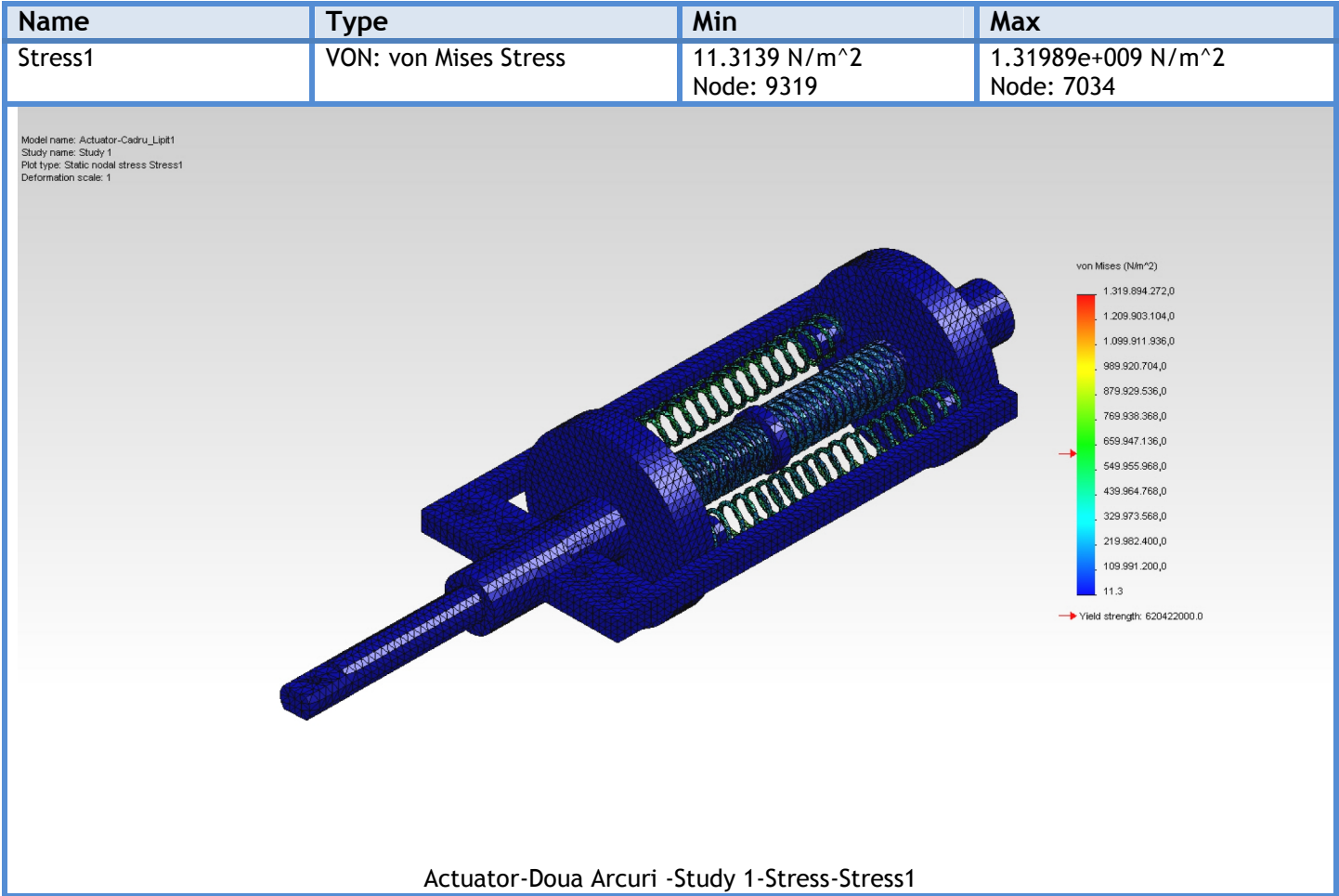
Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N-m	0	0	0	0

Beams

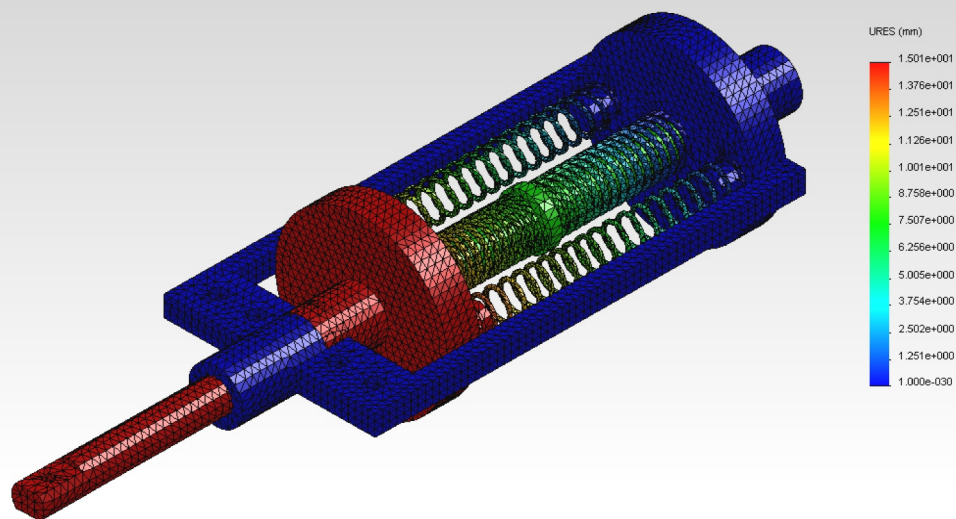
No Data

Study Results



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 10327	15.0142 mm Node: 9907

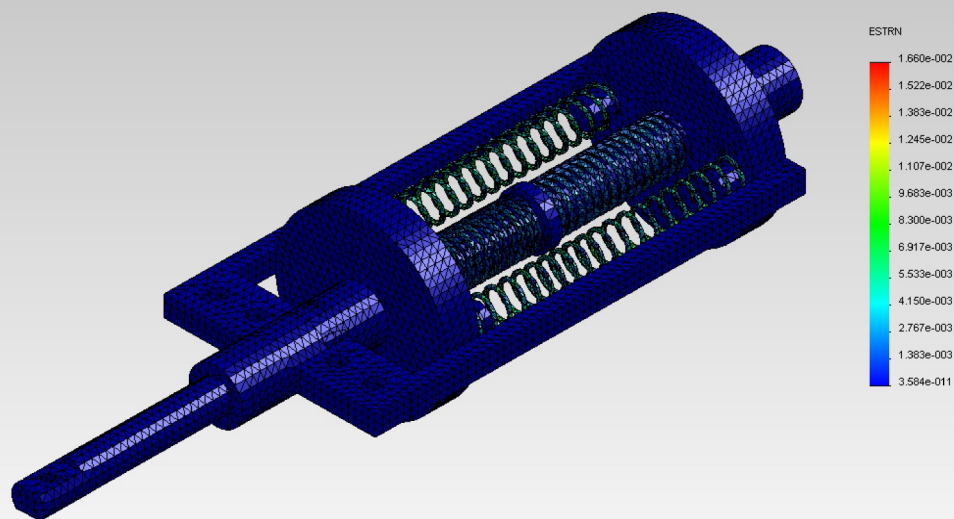
Model name: Actuator-Cadru_Lipit1
 Study name: Study 1
 Plot type: Static displacement Displacement1
 Deformation scale: 1



Actuator-Doua Arcuri -Study 1-Displacement-Displacement1

Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	3.5836e-011 Element: 37084	0.0165998 Element: 15904

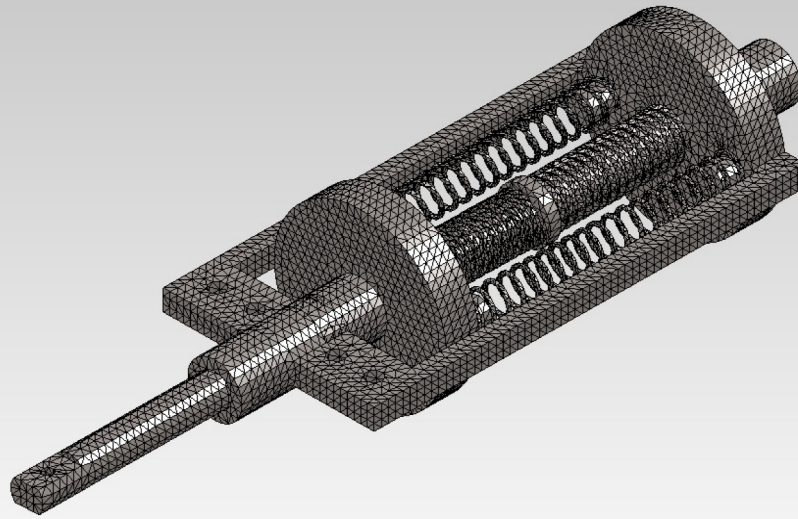
Model name: Actuator-Cadru_Lipit1
Study name: Study 1
Plot type: Static strain Strain1
Deformation scale: 1



Actuator-Doua Arcuri -Study 1-Strain-Strain1

Name	Type
Displacement1	Deformed Shape

Model name: Actuator-Cadru_Lipit1
Study name: Study 1
Plot type: Deformed Shape Displacement1(1)
Deformation scale: 1



Actuator-Doua Arcuri-Study 1-Displacement-Displacement1

Conclusion

Anexa.3 Raport simulare SolidWorks actuator cu trei arcuri de tracțiune

Simulare Actuator Trei Arcuri

Date: 01 decembrie 2011
Designer: Solidworks
Study name: Study 1
Analysis type: Static

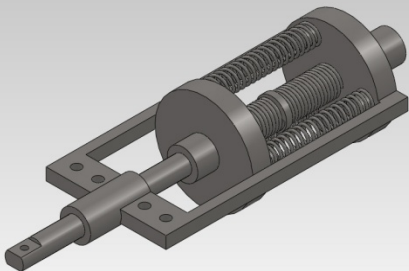


Table of Contents

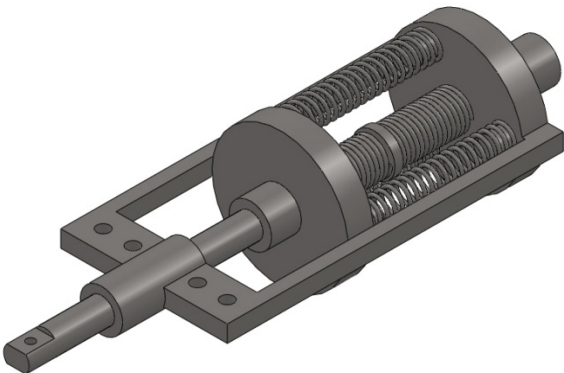
Description.....	1
Assumptions	2
Model Information	2
Study Properties	3
Units	3
Material Properties	4
Loads and Fixtures.....	4
Connector Definitions.....	5
Contact Information.....	5
Mesh Information	5
Sensor Details	6
Resultant Forces	6
Beams.....	Error! Bookmark not defined.
Study Results	7
Conclusion	10

Description

No Data

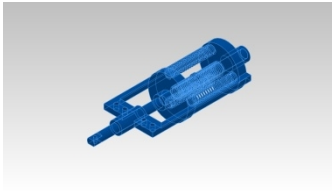
Assumptions

Model Information



Model name: Actuator - Trei Arcuri
Current Configuration: Default

Solid Bodies

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Cut-Extrude15 	Solid Body	Mass:0.323027 lb Volume:1.16122 in^3 Density:0.27818 lb/in^3 Weight:0.322808 lbf	D:\12_NOV_2011\Dan\Actuator-Trei Arcuri.SLDPRT Dec 21 09:53:26 2010

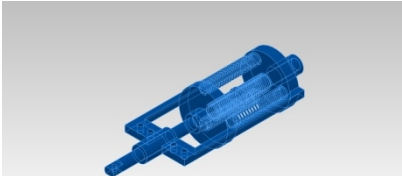
Study Properties

Study name	Study 1
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off
Solver type	Direct sparse solver
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	On
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	On
Compute free body forces	Off
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SolidWorks document (D:\12_NOV_2010\Dan - Actuator - Trei Arcuri)

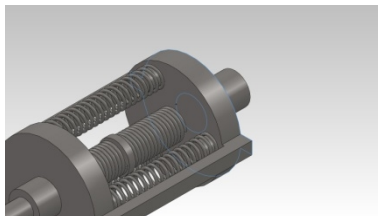
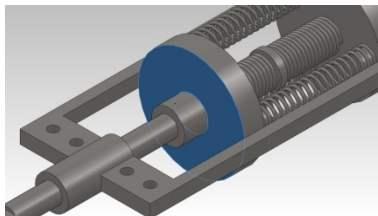
Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m ²

Material Properties

Model Reference	Properties		Components
	Name:	Alloy Steel	SolidBody 1(Combine1) (Actuator-Trei Arcuri)
	Model type:	Linear Elastic Isotropic	
	Default failure criterion:	Max von Mises Stress	
	Yield strength:	6.20422e+008 N/m^2	
	Tensile strength:	7.23826e+008 N/m^2	
	Elastic modulus:	2.1e+011 N/m^2	
	Poisson's ratio:	0.28	
	Mass density:	7700 kg/m^3	
	Shear modulus:	7.9e+010 N/m^2	
	Thermal expansion coefficient:	1.3e-005 /Kelvin	
Curve Data:N/A			

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details			
Fixed-1		Entities: 1 face(s) Type: Fixed Geometry			
Resultant Forces					
Components		X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)		9.90555e-006	3.84264e-006	-155.29	155.29
Reaction Moment(N-m)		0	0	0	0
On Flat Faces-1		Entities: 1 face(s) Type: On Flat Faces Translation: ---, ---, 15 Units: mm			
Resultant Forces					
Components		X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)		0	0	155.306	155.306
Reaction Moment(N-m)		0	0	0	0

Connector Definitions

No Data

Contact Information

No Data

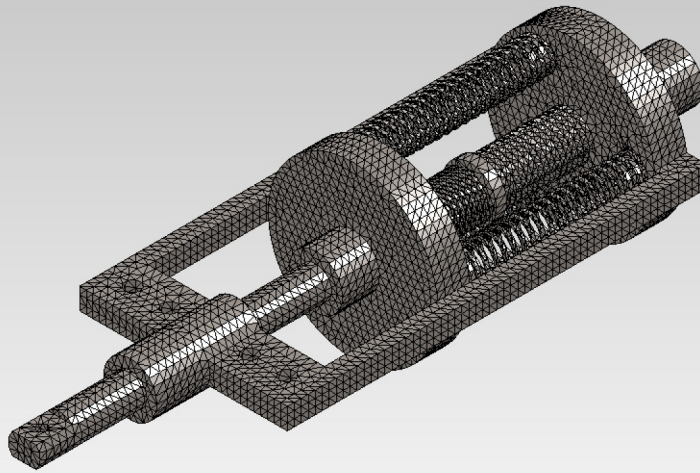
Mesh Information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	On
Jacobian points	4 Points
Element Size	1.33533 mm
Tolerance	0.0667663 mm
Mesh Quality	Draft Quality Mesh

Mesh Information - Details

Total Nodes	25184
Total Elements	83588
Maximum Aspect Ratio	25.404
% of elements with Aspect Ratio < 3	84.2
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.321
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:04:29
Computer name:	TOSHIBA-CARDT

Model name: Actuator_TRIPLU
Study name: Study 1
Mesh type: Solid mesh



Sensor Details

No Data

Resultant Forces

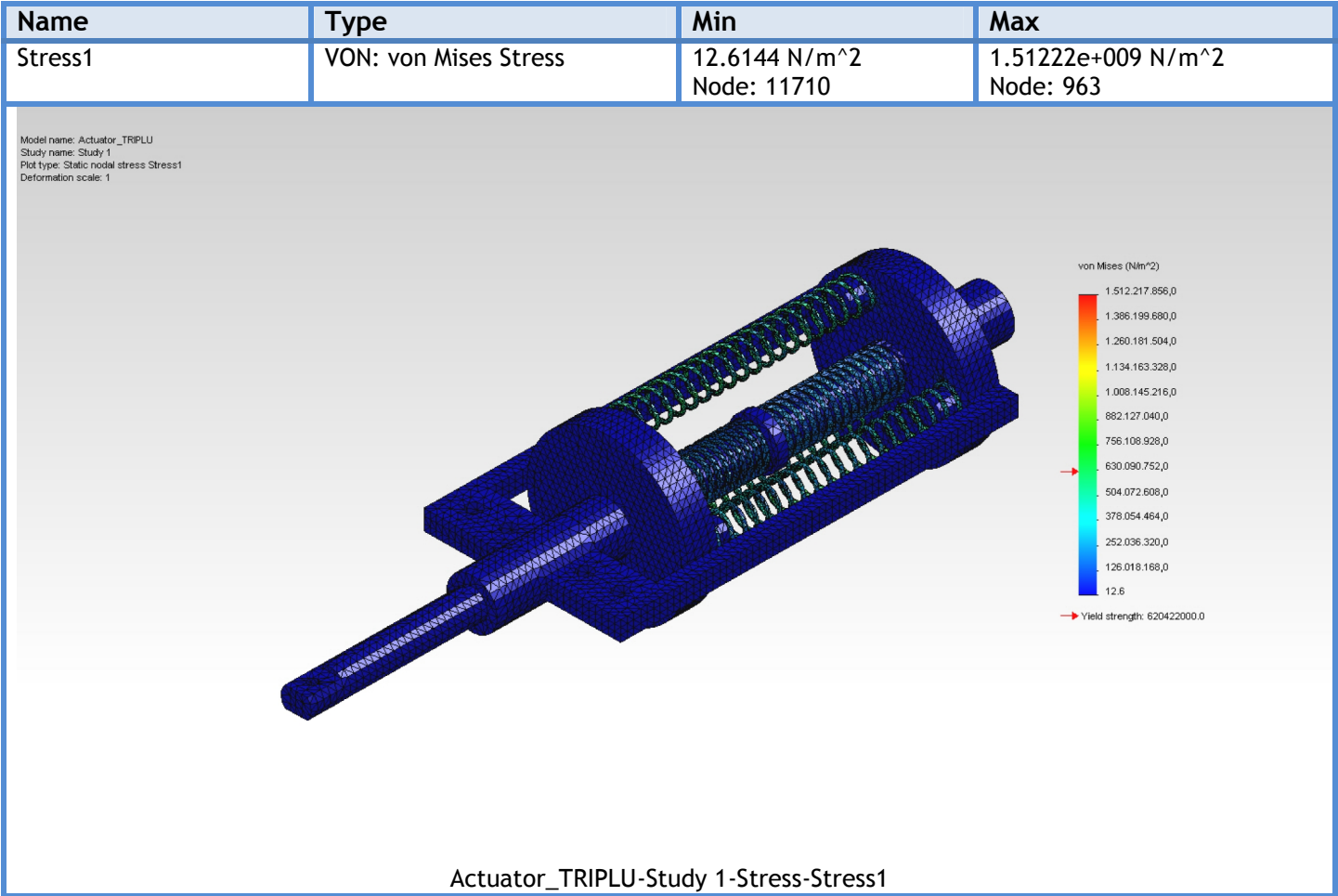
Reaction Forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	9.90555e-006	3.84264e-006	0.0165847	0.0165847

Reaction Moments

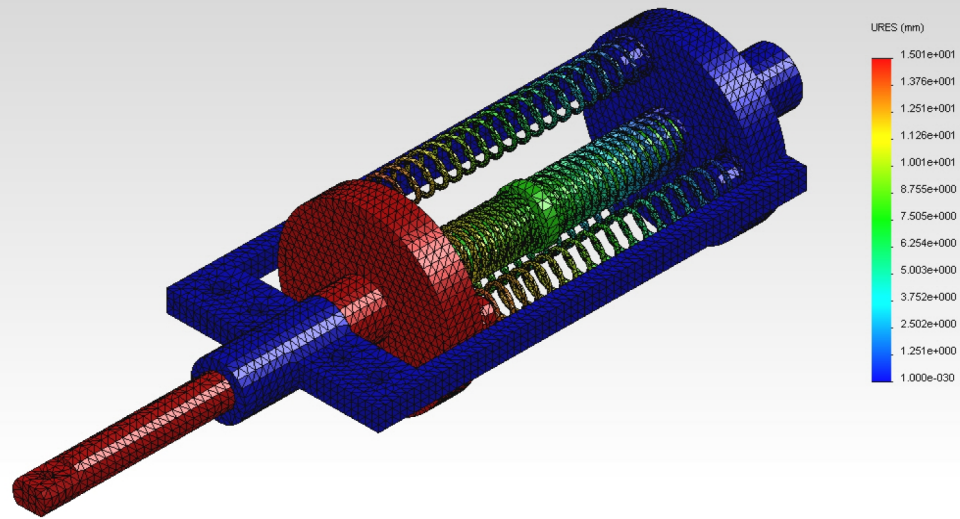
Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N-m	0	0	0	0

Study Results



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 11073	15.0093 mm Node: 11678

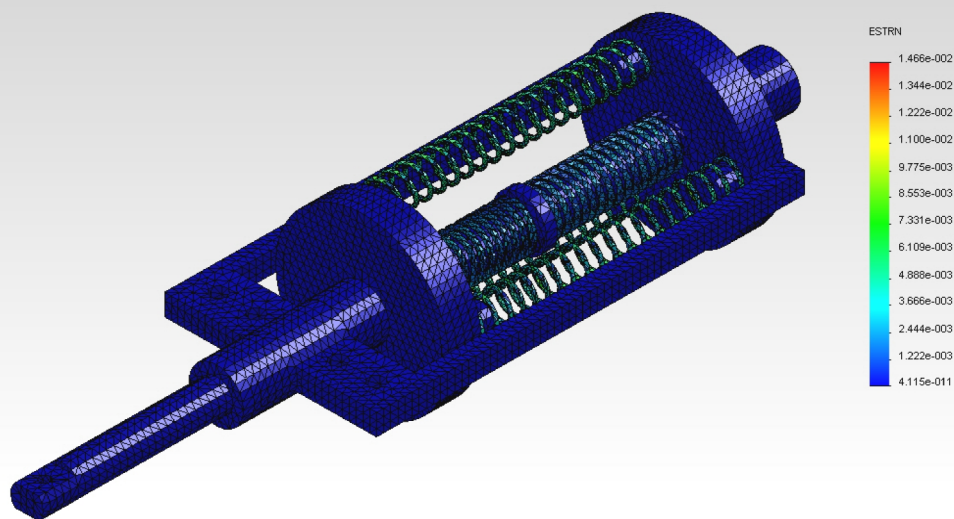
Model name: Actuator_TRIPLU
 Study name: Study 1
 Plot type: Static displacement Displacement1
 Deformation scale: 1



Actuator_TRIPLU-Study 1-Displacement-Displacement1

Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	4.11483e-011 Element: 72393	0.0146628 Element: 26076

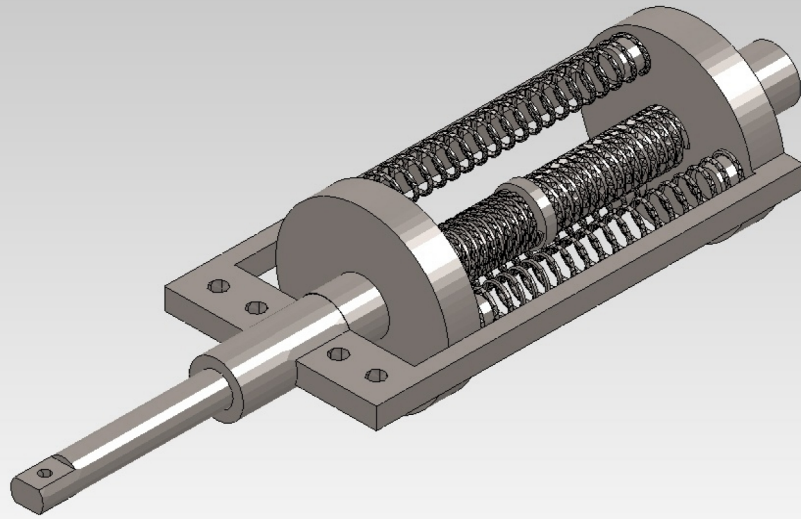
Model name: Actuator_TRIPLU
Study name: Study 1
Plot type: Static strain Strain1
Deformation scale: 1



Actuator_TRIPLU-Study 1-Strain-Strain1

Name	Type
Displacement1{1}	Deformed Shape

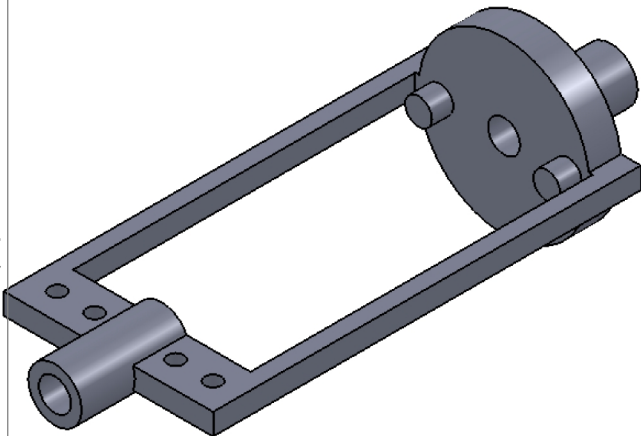
Model name: Actuator_TRIPLU
Study name: Study 1
Plot type: Deformed Shape Displacement1(1)
Deformation scale: 1



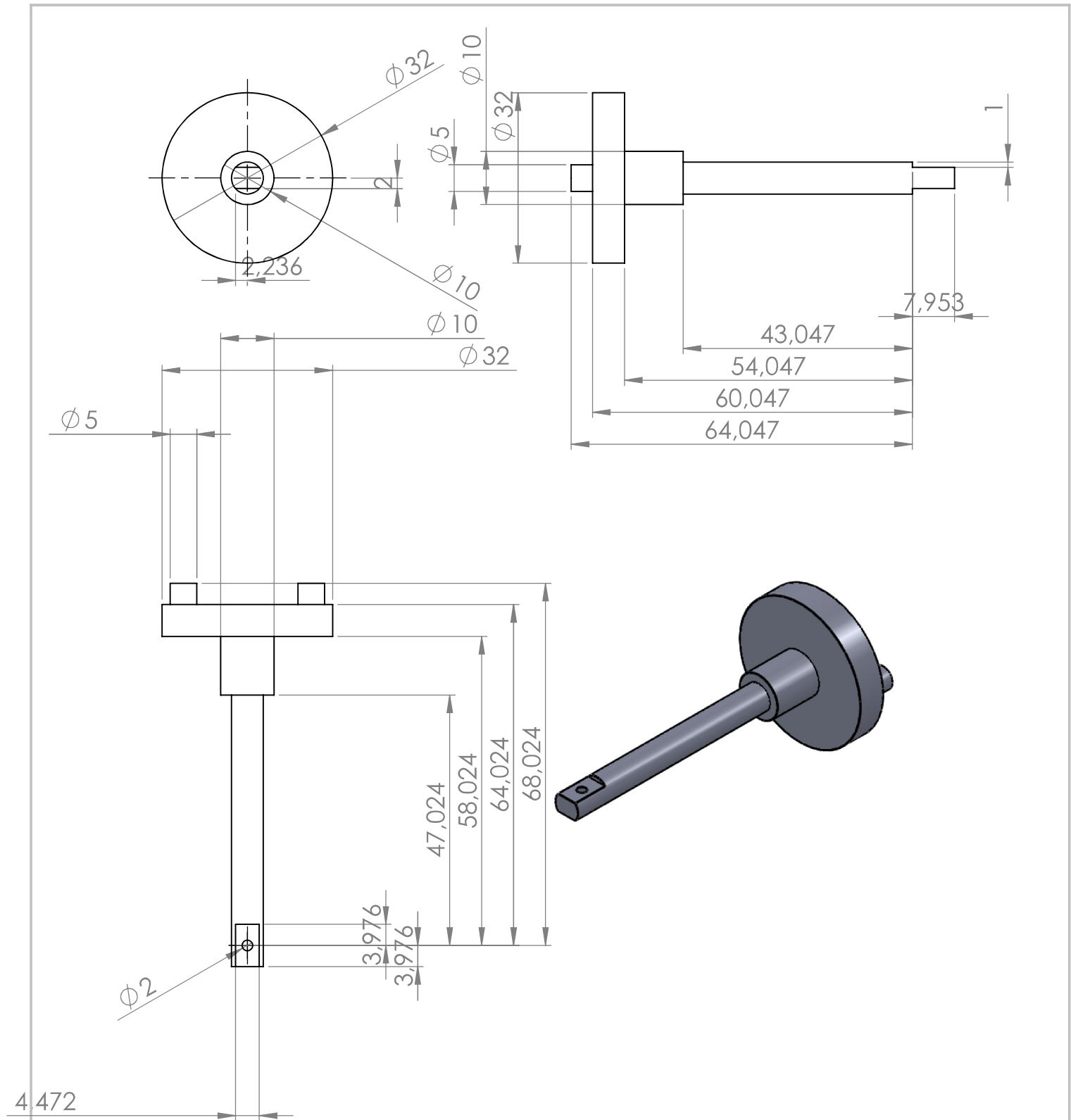
Actuator_TRIPLU-Study 1-Displacement-Displacement1{1}

Conclusion

Anexa 4. Desene părți componente dispozitiv de prehensiune



SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

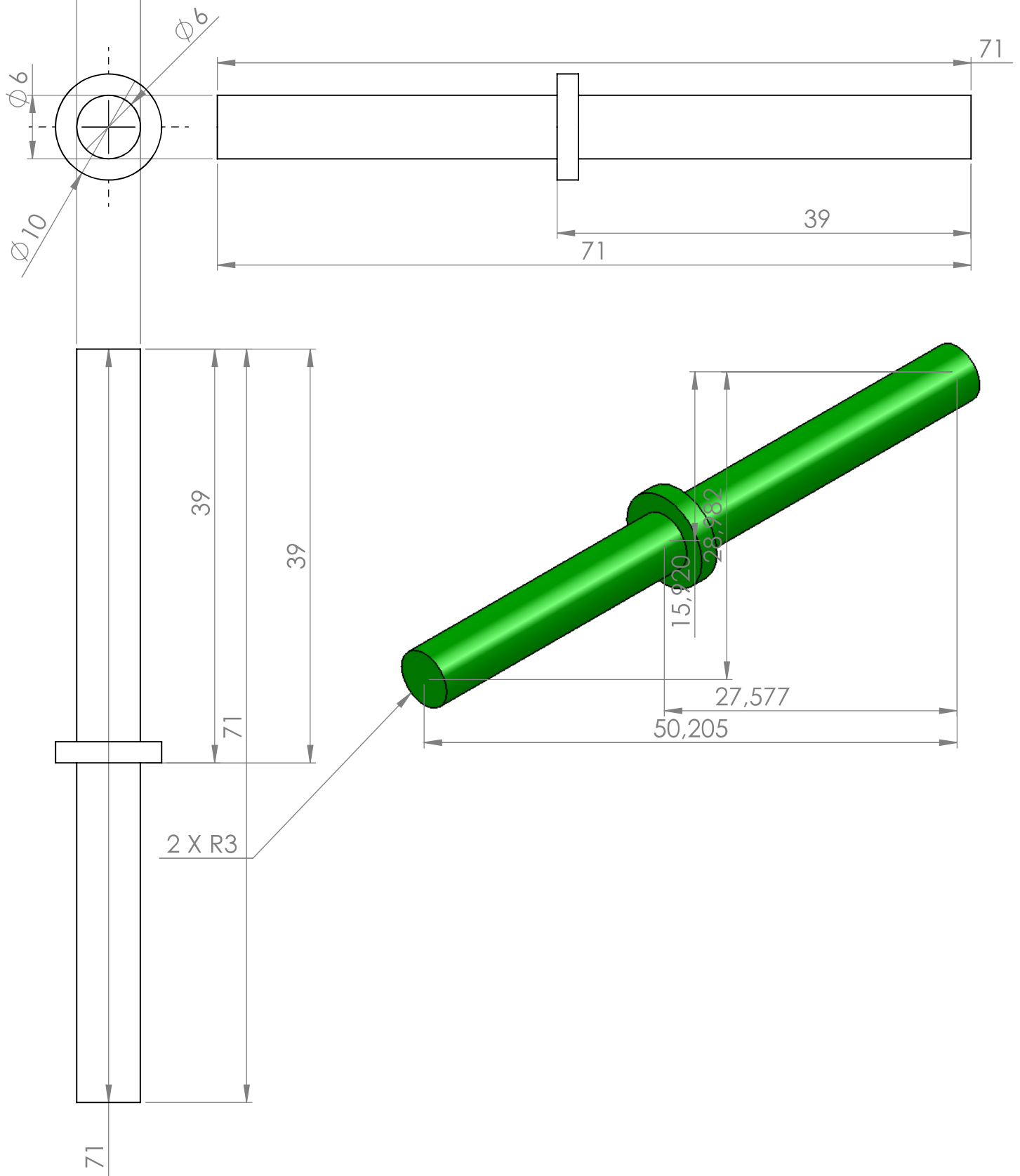
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Amariei Daniel				
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

TITLE:	
DWG NO.	
Prehensor-Pinola_Mobila	A4
SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN Amariei Daniel					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			WEIGHT:		

TITLE:

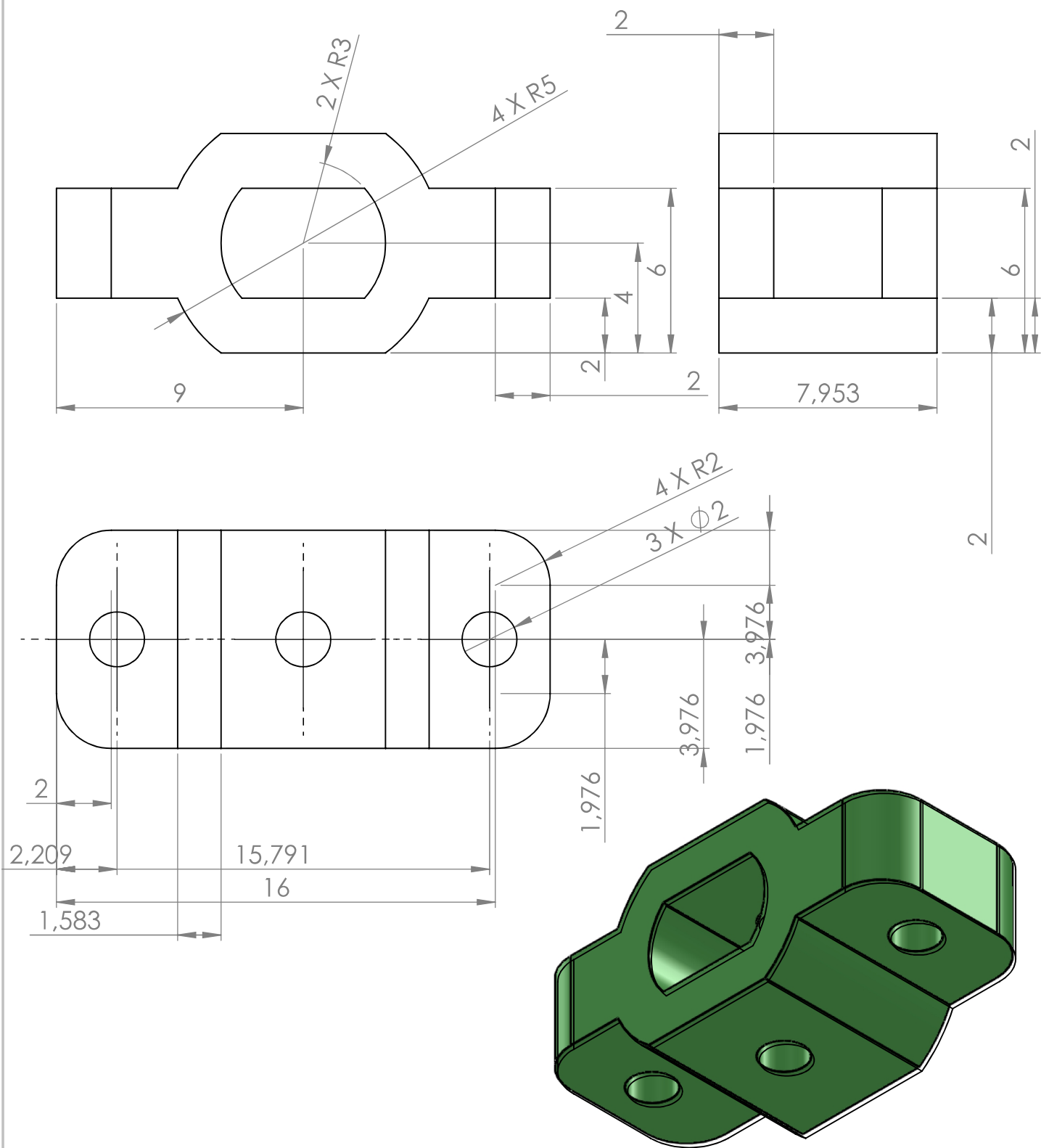
DWG NO.

Prehensor-Ax_Central

A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

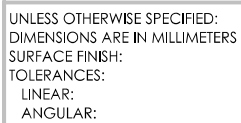
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Amariei Daniel				
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			WEIGHT:		

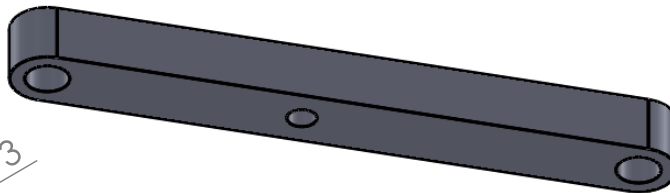
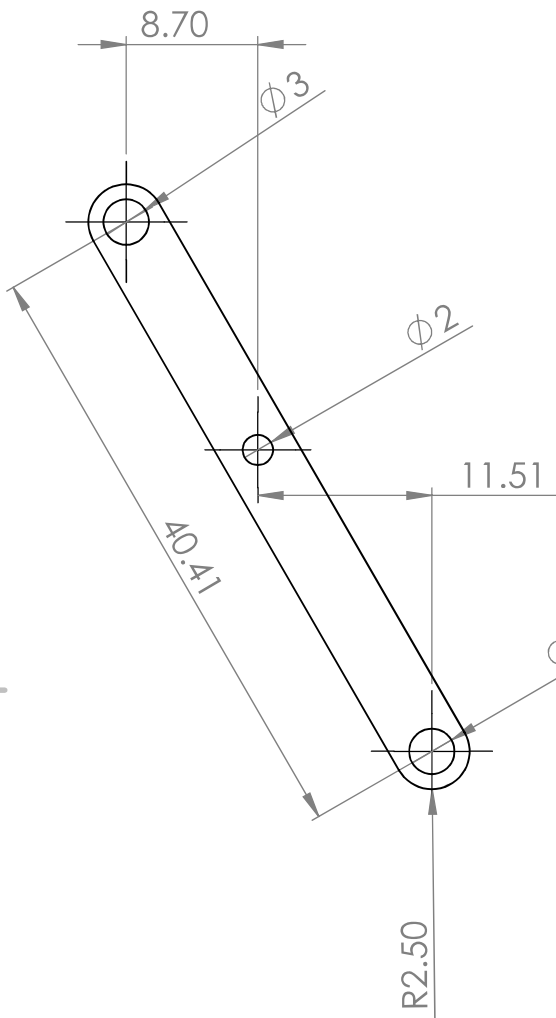
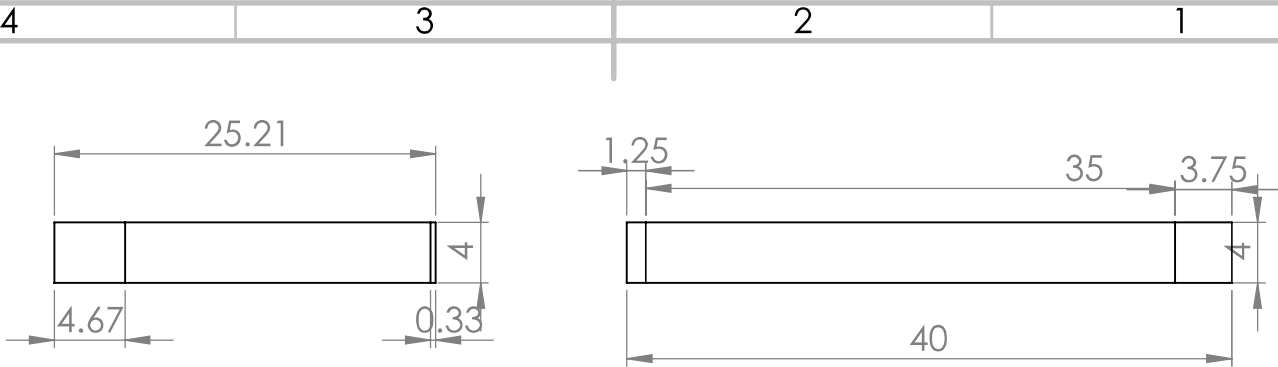
TITLE:		DWG NO.		A4
Prehensor-Bucse_Centrala		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1



DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

REVISION

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	Amariei Daniel				
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

MATERIAL:

WEIGHT:

TITLE:

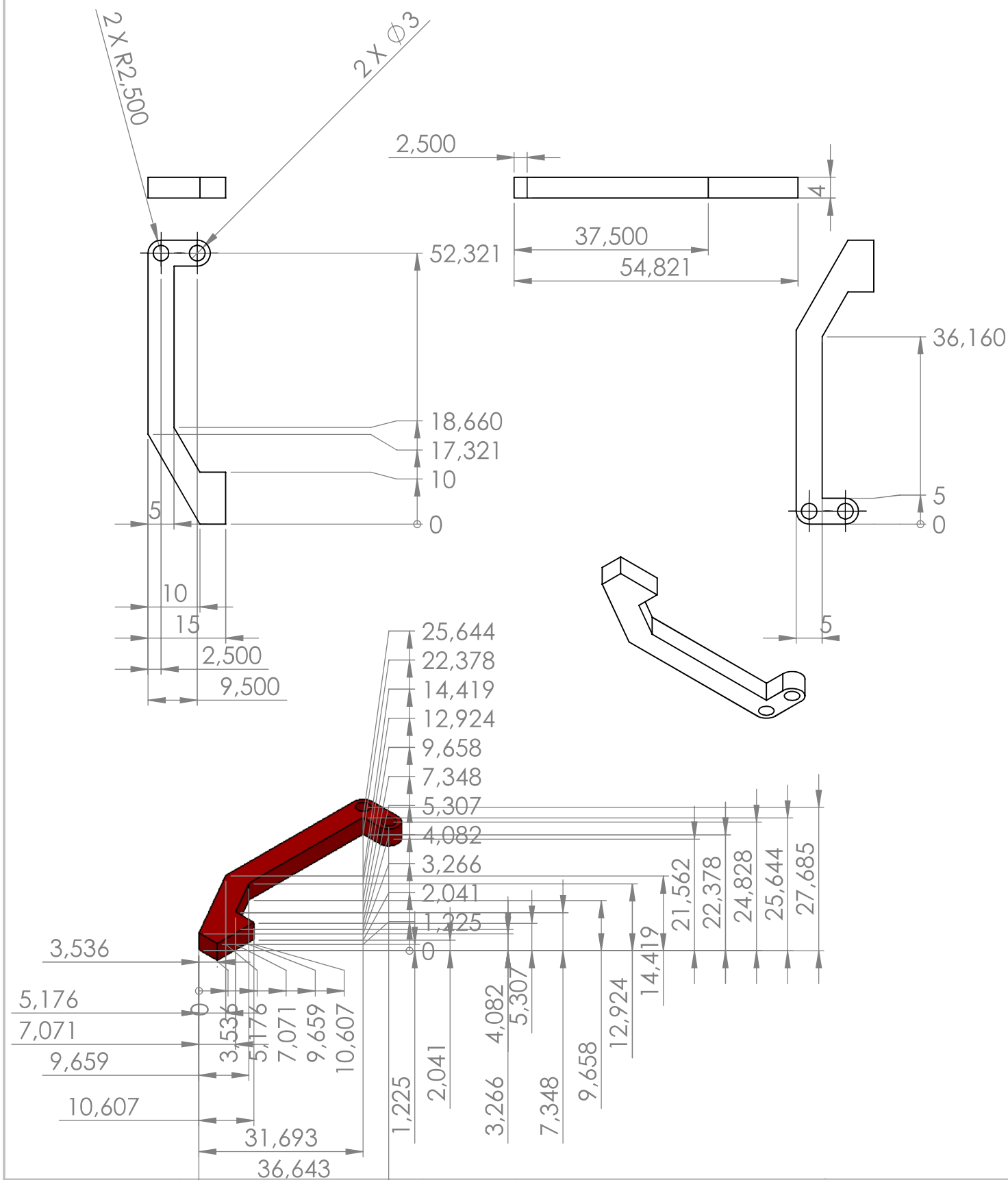
DWG NO.

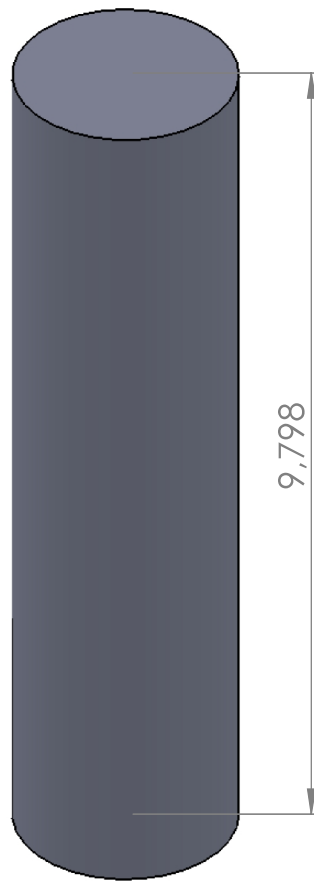
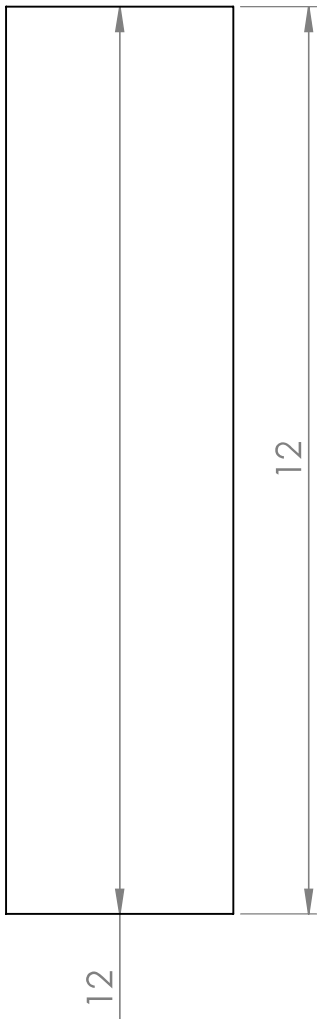
Prehensor-Tija_exterioara

SCALE:1:1

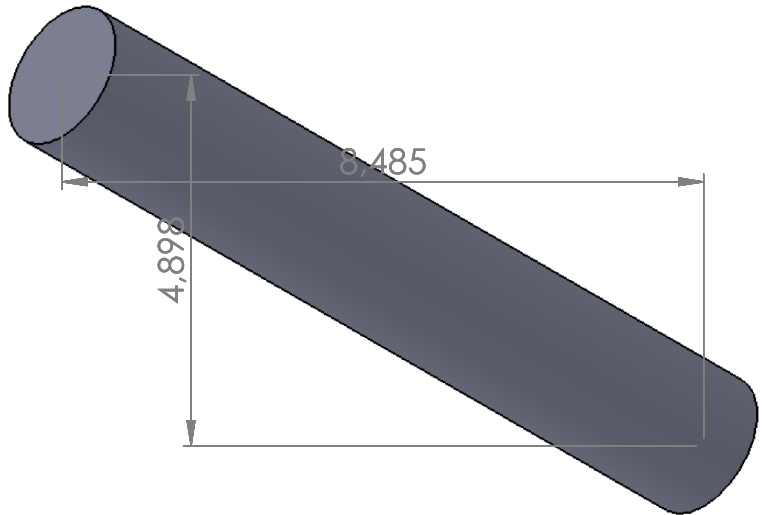
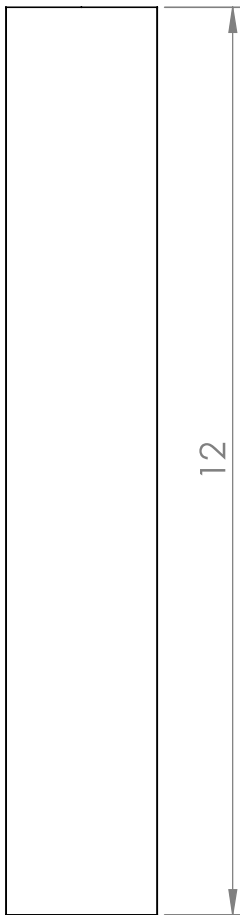
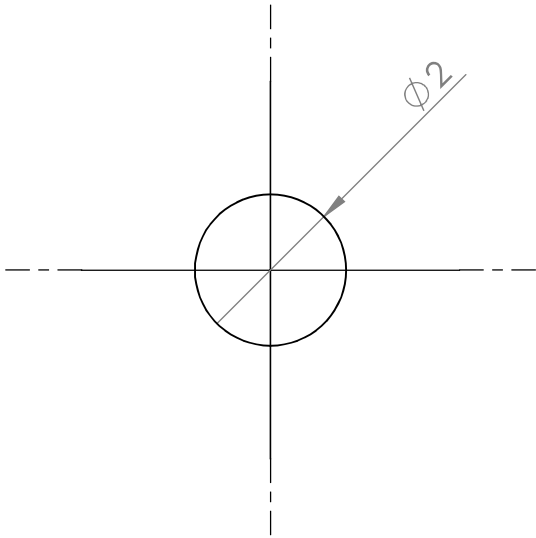
SHEET 1 OF 1

A4





TITLE:	
DWG NO.	A4
Prehensor-Bolt_1	
SCALE:10:1	SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE				
DRAWN	Amariei Daniel						
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A							

TITLE:	
DWG NO.	A4
Prehensor-Bolt_88	
SCALE:10:1	SHEET 1 OF 1

***Anexa 5. Fișa tehnologică a materialului de execuție a părților
componente a dispozitivului de prehensiune***



E-Denstone 3SP™ Peach

EnvisionTEC's E-Denstone 3SP™ Material was developed for model manufacturing. The peach color provides an attractive choice for modeling that is similar in look and feel to common die stones used in dental labs. It can be used with traditional dental manufacturing methods or as a CAD based model solution for any MCAD application. The low viscosity formula combined with high accuracy EnvisionTEC 3SP™ printers helps to produce superior results with no loss of detail. E-Denstone 3SP™ is also tough enough to check form and fit without any loss of fit or causing excessive wear on the contact surfaces. The cleanup does not use messy oils or heat that can cause distortion and takes only minutes. The biggest advantage is its fast build time, even running with 35 micron resolution in Z. This means fast turnaround of highly detailed accurate models.

Material Properties*

Description	Value
Tensile Strength	56 MPa
Elongation at Break	3.5%
Flexural Strength	115 MPa
Flexural Modulus	3350 MPa
HDT (Heat Deflection Temperature) No heat treatment necessary	140° C (284°F)

*All data provided is preliminary data and must be verified by the individual user.

Recommended Machines

ULTRA® 3SP™, ULTRA® 3SP™ HD, 3-Dent®, ULTRA® 3SP™ Ortho

Applications

Dental, MCAD

EnvisionTEC GmbH

Brüsseler Straße 51 • D-45968
Gladbeck • Germany
Phone +49 2043 9875-0
Fax +49 2043 9875-99

EnvisionTEC, Inc.

15162 S. Commerce Dr.
Dearborn, MI 48120 • USA
Phone +1-313-436-4300
Fax +1-313-436-4303

www.envisiontec.com

info@envisiontec.com

