



ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: Inginerie Mecanică

Departamentul Autovehicule și Transporturi (ATR)

Ing. Mădălin-Petru SBANCA

**CERCETĂRI PRIVIND ÎNFĂȘURAREA ROBOTIZATĂ A FIBRELOR DE
CARBON ÎN MATRIȚELE SUPORT ALE STRUCTURILOR
COMPOZITE**

**RESEARCHES REGARDING ROBOTIC FIBER WINDING IN
SUPPORT MATRIX OF COMPOSITE STRUCTURES**

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător științific

Prof.dr.ing. Gheorghe-Leonte MOGAN

BRAȘOV, 2019

D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov

Nr. din

PREȘEDINTE:	Prof. Dr. Ing. Adrian ȘOICA Universitatea Transilvania din Braşov
CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:	Prof. Dr. Ing. Gheorghe Leonte MOGAN Universitatea Transilvania din Braşov
REFERENȚI:	Prof. Dr. Ing. Dorian COJOCARU Universitatea din Craiova Prof. Dr. Ing. Cristian-Vasile DOICIN Universitatea Politehnica din București Prof. Dr. Ing. Claudiu Radu POZNA Universitatea Transilvania din Braşov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat:, ora, sala

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa sbanca.madalin.petru@unitbv.ro

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.

CUPRINS

	Pg Teză	Pg Rezumat
PREFAȚĂ	9	-
LISTA FIGURILOR	11	-
LISTA TABELELOR	15	-
LISTA ALGORITMILOR	16	-
LISTA ABREVIERILOR	17	9
1. INTRODUCERE	19	11
1.1 Aspecte generale	19	11
1.2 Necesitatea și justificarea temei	19	11
1.3 Scopul și obiectivele cercetării.....	20	12
1.4 Metodologia și etapele cercetării	21	12
1.5 Structura și conținutul tezei de doctorat.....	23	13
2. STRUCTURI MECANICE DIN MATERIALE COMPOZITE.		
TEHNOLOGII DE OBȚINERE	29	15
2.1 Aspecte generale	29	15
2.2 Componentele și tehnologiile de obținere a structurilor din materiale compozite	29	15
2.2.1 Tehnologii de obținere a structurilor compozite prin depunere	31	16
2.2.2 Tehnologii de obținere a structurilor compozite prin înfășurare ...	31	16
2.2.2.1 Înfășurarea (bobinarea) cu cap mobil	31	-
2.2.2.2 Înfășurarea (bobinarea) cu cap fix	32	-
2.2.2.3 Înfășurarea fibrelor pentru obținerea structurilor compozite.....	32	-
2.3 Sisteme de înfășurare a fibrei pentru obținerea structurilor compozite	33	17
2.3.1 Structura generală	33	17
2.3.2 Dispozitive de impregnare a fibrei	34	-
2.4 Dispozitive de tensionare a fibrei.....	35	17
2.5 Concluzii	37	18
3. ROBOȚI INDUSTRIALI ADAPTABILI PENTRU PROCESE TEHNOLOGICE DE ÎNFĂȘURARE A FIBRELOR	39	19
3.1 Aspecte generale	39	19
3.2 Clasificarea roboților industriali ficși.....	40	19
3.3 Funcțiile roboților industriali	42	20
3.4 Structura generală a roboților industriali.....	42	20
3.4.1 Sistemul mecanic	43	21
3.4.1.1 Structura generală	43	21
3.4.1.2 Cinematică directă și inversă.....	44	21
3.4.2 Sistemul de acționare.....	44	22
3.4.3 Sistemul senzorial.....	45	22
3.4.4 Sistemul de control și comandă.....	46	22
3.4.4.1 Structura generală a unui controler.....	46	22
3.4.4.2 Tipurile sistemelor de control.....	47	23
3.4.4.3 Algoritmi de control	50	-
3.4.4.4 Planificarea, generarea și urmărirea traiectoriilor	51	-
3.4.5 Programarea roboților	51	23
3.5 Roboți industriali colaborativi.....	54	24
3.5.1 Clasificare	54	-
3.5.2 Metode de colaborare	56	24
3.5.3.1 Colaborarea roboților asistată video	56	-

3.5.3.2	Colaborarea master-slave	56	-
3.5.3	Programarea roboților colaborativi.....	57	25
3.6	Sisteme senzoriale externe și de comunicații.....	59	25
3.6.1	Sisteme senzoriale externe.....	60	25
3.6.2	Sisteme de comunicare interroboți	61	-
3.6.3	Celule robotice ca agenți de cooperare și comunicație.....	62	26
3.7	Robotizarea operațiilor tehnologice industriale	65	27
3.7.1	Robotizarea operațiilor de asamblare	65	27
3.7.2	Robotizarea operațiilor de înfășurare a fibrelor pentru obținerea de structuri compozite	66	27
3.8	Concluzii	67	28
4.	MODELAREA PROCESELOR DE ÎNFĂȘURARE ROBOTIZATĂ A FIBRELOR	69	29
4.1	Descrierea structurii compozite.....	69	29
4.2	Planificarea, generarea și implementarea traiectoriilor în procesul de înfășurare	70	30
4.2.1	Planificarea traiectoriilor de înfășurare	70	30
4.2.2	Generarea traiectoriilor de înfășurare	72	31
4.2.2.1	Algoritmul procesului de generare a traiectoriei de înfășurare	72	31
4.2.2.2	Generarea traiectoriilor în medii virtuale	73	32
4.2.3	Ajustarea traiectoriilor virtuale.....	74	-
4.2.4	Implementarea traiectoriilor în mediul robot/roboți.....	76	32
4.3	Modelarea și algoritimizarea procesului de tensionare a fibrei.....	77	33
4.3.1	Model static de înfășurare a fibrei cu tensionare.....	78	34
4.3.2	Determinarea efortului de tensionare	80	36
4.4	Concluzii	85	38
5.	SISTEM ROBOTIZAT DE TENSIONARE ȘI ÎNFĂȘURARE A FIBRELOR	87	39
5.1	Subsistemul de măsurare a efortului de tensionare a fibrei.....	87	39
5.2	Dispozitivul de tensionare controlată a fibrei	89	40
5.2.1	Structura funcțional-constructivă	90	40
5.2.2	Subsistemul de control tensionare	91	41
5.2.3	Reglarea subsistemului de tensioare.....	92	42
5.2.3.1	Modelul matematic	92	42
5.2.3.2	Reglarea poziționării motorului de tensionare.....	93	43
5.2.3.3	Simularea și testarea regulatorului de poziționare a motorului de tensionare	96	45
5.2.3.4	Algoritmi de reglare dinamică a tensionării	98	46
5.3.	Concluzii	98	46
6.	SISTEM CU ROBOȚI COLABORATIVI PENTRU ÎNFĂȘURAREA FIBRELOR (SROC-ÎNF)	101	47
6.1	Structura hardware a sroc-înf	101	47
6.1.1	Subsistemul de alimentare cu fibră.....	103	48
6.1.2	Subsistemul robotic colaborativ de înfășurare.....	104	48
6.1.3	Implementarea dispozitivului de tensionare	105	-
6.2	Sistemul de comandă și control	105	49
6.2.1	Controlerul master	105	49
6.2.2	Algoritmi de comunicație	107	50
6.2.2.1	Algoritmi de comunicație cu roboții.....	107	-
6.2.2.2.	Algoritmi de comunicație cu subsistemul de achiziție a forțelor ..	108	-
6.2.3.	Algoritmi de control și comandă	110	50

6.2.3.1	Algoritmi de control a traiectoriei	110	50
6.2.3.2	Algoritmi de control a tensionării fibrei	111	52
6.3	Pachete software folosite.....	113	52
6.4	Calibrarea roboților colaborativi	113	52
6.5	Concluzii	115	53
7.	STUDII EXPERIMENTALE.....	117	54
7.1	Configurarea și implementarea mediilor de testare	117	54
7.2	Studii experimentale de înfășurare cu tensionare cu un robot	118	55
7.2.1	Planificarea experimentelor	118	55
7.2.2	Realizarea experimentelor și achiziția datelor.....	119	55
7.2.3	Prelucrarea datelor și analiza rezultatelor.....	120	56
7.3	Studii experimentale de înfășurare cu tensionare controlată cu doi roboți	124	57
7.3.1	Realizarea experimentelor și achiziția de date	124	57
7.3.2	Prelucrarea datelor și analiza rezultatelor.....	124	58
7.4	Studii experimentale de asamblare și manipulare	130	62
7.4.1	Planificarea experimentelor de asamblare cu roboți colaborativi	130	62
7.4.2	Realizarea experimentelor și achiziția de date.....	133	63
7.4.3	Prelucrarea și analiza rezultatelor experimentelor de asamblare...	133	64
7.4.4	Manipularea obiectelor atipice cu doi roboți colaborativi.....	135	65
7.5	Concluzii	137	66
8.	CONCLUZII, CONTRIBUȚII PROPRII, VALORIFICAREA REZULTATELOR ȘI NOI DIRECȚII DE CERCETARE.....	139	67
8.1.	Concluzii finale	139	67
8.2.	Contribuții proprii	143	69
8.3.	Valorificarea rezultatelor cercetării.....	144	70
8.3.1.	Lucrări publicate.....	144	70
8.3.2.	Participări la conferințe	144	71
8.4.	Direcții de cercetare viitoare	145	71
BIBLIOGRAFIE.....		147	72
ANEXE		159	-
ANEXA 1 – Funcții matlab utilizate pentru simularea reglării poziției motorului de tensionare.....		159	-
ANEXA 2 – Cod sursă control platformă master C#.....		161	-
ANEXA 3 – Cod sursă achiziție și transmitere date de la controlerul senzorului de forță.....		183	-
ANEXA 4 – Cod sursă pentru poziționarea motorului de tensionare implementat în controlerul Arduino.....		185	-
ANEXA 5 – Program de înfășurare a fibrei de carbon în matriță cu robot IRB 1600		191	-
ANEXA 6 – Program robot IRB 2400 – de poziționare a matriței.....		203	-
REZUMAT		221	77
CV română		223	78
CV engleză		224	79
DECLARAȚIE DE AUTENTICITATE.....		225	-

CONTENTS

	Pg Thesis	Pg Resume
PREFACE	9	-
LIST OF FIGURES	11	-
LIST OF TABLES	15	-
LIST OF ALGORITHMS	16	-
LIST OF ABBREVIATIONS	17	9
1. INTRODUCTION	19	11
1.1 General aspects.....	19	11
1.2 Necessity and justification of the topic	19	11
1.3 Research objectives.....	20	12
1.4 Methodology and stages of research	21	12
1.5 Structure and contents of the PhD thesis	23	13
2. MECHANICAL STRUCTURES OF COMPOSITE MATERIALS.		
MANUFACTURING TECHNOLOGIES	29	15
2.1 General aspects.....	29	15
2.2 Components and manufacturing technologies of composite material structures	29	15
2.2.1 Placement manufacturing technology of composite structures	31	16
2.2.2 Winding manufacturing technology of composite structures.....	31	16
2.2.2.1 Fly winding method.....	31	-
2.2.2.2 Spindle winding method.....	32	-
2.2.2.3 Fiber winding for obtaining composite materials.....	32	-
2.3 Fiber winding systems for obtaining composite structures.....	33	17
2.3.1 General structure.....	33	17
2.3.2 Fiber impregnation devices	34	-
2.4 Fiber tensioning devices.....	35	17
2.5 Conclusions.....	37	18
3. ADAPTABLE INDUSTRIAL ROBOTS FOR FIBER WINDING TECHNOLOGICAL PROCESSES	39	19
3.1 General aspects.....	39	19
3.2 Fix industrial robots classification	40	19
3.3 Industrial robots functions	42	20
3.4 Industrial robots general structure.....	42	20
3.4.1 Mechanical System.....	43	21
3.4.1.1 General structure.....	43	21
3.4.1.2 Forward and revers kinematics.....	44	21
3.4.2 Drive system	44	22
3.4.3 Sensorial system	45	22
3.4.4 Command and control system	46	22
3.4.4.1 General structure of a controller.....	46	22
3.4.4.2 Control system types	47	23
3.4.4.3 Control algorithms	50	-
3.4.4.4 Trajectories planning, generating and fallowing	51	-
3.4.5 Robots programming	51	23
3.5 Collaborative industrial robots.....	54	24
3.5.1 Classification	54	-
3.5.2 Collaboration methods.....	56	24
3.5.3.1 Video assisted robot collaboration	56	-

3.5.3.2	Master-slave collaboration	56	-
3.5.3	Collaborative robots programming.....	57	25
3.6	External sensorial and communication systems.....	59	25
3.6.1	External sensorial systems.....	60	25
3.6.2	Inter robot communication systems.....	61	-
3.6.3	Robotic cell as cooperation and communication agents.....	62	26
3.7	Robotic industrial technological processes	65	27
3.7.1	Robotic assembly processes	65	27
3.7.2	Robotic fibers winding process for composite structures manufacturing	66	27
3.8	Conclusions	67	28
4.	ROBOTIC FIBER WINDING PROCESS MODELING	69	29
4.1	Composite structure description.....	69	29
4.2	Trajectory planning, generating and implementation in winding process	70	30
4.2.1	Winding trajectory planning.....	70	30
4.2.2	Winding trajectory generating	72	31
4.2.2.1	Winding trajectory generating process algorithm.....	72	31
4.2.2.2	Trajectory generating in virtual environment	73	32
4.2.3	Virtual trajectory adjustment	74	-
4.2.4	Trajectory implementation in robot environment.....	76	32
4.3	Fiber tensioning process modeling and algorithmization	77	33
4.3.1	Static model of tensioned fiber winding.....	78	34
4.3.2	Tensioning effort identification	80	36
4.4	Conclusions	85	38
5.	ROBOTC SYSTEM FOR FIBER TENSIONING AND WINDING	87	39
5.1	Fiber tensioning effort measurement system	87	39
5.2	Fiber tension control device	89	40
5.2.1	Constructive-functional structure	90	40
5.2.2	Tension control subsystem	91	41
5.2.3	Tensioning subsystem controlling.....	92	42
5.2.3.1	Mathematical model	92	42
5.2.3.2	Tensioning motor position controlling	93	43
5.2.3.3	Simulation and testing of tensioning motor position controller ...	96	45
5.2.3.4	Dynamic tension controller algorithms	98	46
5.3.	Conclusions	98	46
6.	COLLABORATIVE ROBOTIC SYSTEM FOR FIBER WINDING (SROC-ÎNF)	101	47
6.1	SROC-ÎNF hardware structure.....	101	47
6.1.1	Fiber supply subsystem	103	48
6.1.2	Collaborative robotic subsystem for winding.....	104	48
6.1.3	Tensioning device implementation.....	105	-
6.2	Command and control system.....	105	49
6.2.1	Master controller.....	105	49
6.2.2	Communication algorithms	107	50
6.2.2.1	Robot communication algorithms	107	-
6.2.2.2.	Force acquisition subsystem communication algorithms	108	-
6.2.3.	Control and command algorithms	110	50
6.2.3.1	Trajectory control algorithms	110	50
6.2.3.2	Fiber tension control algorithms.....	111	52
6.3	Used software packages	113	52
6.4	Collaborative robots calibration.....	113	52

6.3. Conclusions	115	53
7. EXPERIMENTAL STUDIES	117	54
7.1 Testing environment configuration and implementation	117	54
7.2 Experimental studies for tensioned winding with one robot.....	118	55
7.2.1 Experiments planning	118	55
7.2.2 Experiment realizing and data acquisition.....	119	55
7.2.3 Data processing and results analyze	120	56
7.3 Experimental studies for controlled tensioned winding with two robot	124	57
7.3.1 Experiment realizing and data acquisition	124	57
7.3.2 Data processing and results analyze	124	58
7.4 Experimental studies for assembly and handling tasks.....	130	62
7.4.1 Collaborative robots assembly experiments planning	130	62
7.4.2 Experiment realizing and data acquisition.....	133	63
7.4.3 Data processing and results analyze for assembly experiments	133	64
7.4.4 Handling atypical objects with two collaborative robots	135	65
7.5 Conclusions	137	66
8. CONCLUSIONS, ORIGINAL CONTRIBUTIONS, RESULTS		
CAPITALIZATION AND NEW RESEARCH DIRECTIONS	139	67
8.1. Final conclusions.....	139	67
8.2. Original contributions	143	69
8.3. Capitalization the results of the research	144	70
8.3.1. Published papers	144	70
8.3.2. Conference participation.....	144	71
8.4. Future research directions	145	71
BIBLIOGRAPHY	147	72
ANNEXES	159	-
Annex 1 – Matlab functions used for tension motor position control simulation	159	-
Annex 2 – Source code for C# master platform control	161	-
Annex 3 – Source code for data acquisition and transfer from force sensor controller	183	-
Annex 4 – Source code for tension motor positioning implemented in Arduino controller.....	185	-
Annex 5 – Carbon fiber winding program with IRB 1600 robot in the matrix	191	-
Annex 6 – IRB 2400 robot program – for matrix positioning	203	-
SUNNARY	221	77
CV romanian	223	78
CV english	224	79
STATEMENT OF AUTHENTICITY	225	-

LISTA ABREVIERILOR

AFP	Automated Fiber Placement
AOB	Active Observer
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CC	Curent Continuu
CF	Control în Forță
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CNC	Computer Numerical Controler
CPCI	Compact PCI
DOF	Degree of Freedom
EURON	EUropean RObotics research Network
FMC	Flexible Manufacturing Cells
FT	Funcție de transfer
HRI	Human-Robot Interaction
IFR	Federația Internațională de Robotică
ISA	Industry Standard Architecture
ISO	Organizația Internațională de Standardizare
OSIM	Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci
P	Proporțional
PC	Personal Computer
PCI	Peripheral Component Interface
PC-SDK	Personal Computer - Software Development Kit
PD	Proporțional Derivativ
PDT1	Proporțional Derivativ cu întârziere de ordin I
PI	Proporțional Integrativ
PID	Proporțional Integrator Derivativ
PWM	Pulse Width Modulation
RAB	Robot Application Builder
RAP	Robot Application Protocol
RPC	Remote Procedure Call
RTM	Resin Transfer Molding
SCADA	Supervisory control and data acquisition
SROC-ÎNF	Sistem cu ROboți Colaborativi pentru ÎNFășurarea fibrelor
TCP	Tool Center Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UDP	User Data Protocol
USB	Universal Serial Bus
VME	Versa Module Eurocard

1. INTRODUCERE

1.1 ASPECTE GENERALE

Actual tehnologiile industriale sunt într-o continuă dezvoltare și schimbare. În general, se dorește automatizarea avansată (inteligentă, colaborativă) a proceselor tehnologice, eficiente energetic, la costuri reduse; una din direcțiile care se înscrie în această tendință este dezvoltarea de noi tehnologii de înlocuire a materialelor clasice. În domeniile auto și aeronautic se poate vedea că din ce în ce mai mult, materialele clasice (oțeluri, aliaje din aluminiu) pentru construcția fuzelajelor și chiar a altor componente încep să fie înlocuite cu *materiale compozite* care asigură performanțe ridicate la mase mult reduse. Astfel, se începe o perioadă a utilizării structurilor din materiale compozite pe bază de carbon, fibră de sticlă sau kevlar etc. Metodele de obținere a acestor materiale sunt încă la început și nu există standarde bine definite.

În prezent utilizarea *roboților industriali* în aplicații tehnologice de procesare sau de asamblare cu toleranțe mici sunt încă la început deoarece, se întâmpină probleme legate pe de o parte, de erorile de poziționare, de măsurare cu senzori, de identificare a obstacolelor din mediu etc. și pe de altă parte, de conducerea interactivă, posibilitățile de comunicație în timp real etc. Astfel, se impune implementarea unor noi algoritmi și metode de comunicare între roboți care prin utilizare, conferă sistemului integrat, robot sau multirobot, caracteristici de sistem inteligent.

Studiile dezvoltate în această lucrare se înscriu în tendințele actuale de identificare și implementare de noi metode și sisteme tehnologice de producție, cu precădere, pentru obținerea de structuri din fibră de carbon prin înfășurarea acesteia în matrițe suport, într-un mod complet automatizat în cadrul unei celule flexibile cu roboți industriali.

1.2 NECESITATEA ȘI JUSTIFICAREA TEMEI

Structurile din materiale compozite încep să fie din ce în ce mai utilizate în diverse industrii, nu doar pentru industria aerospațială, ci și pentru cea nautică și, mai ales, pentru cea auto [Parsons, 2002; Xiaodong, 2016; Păltinișanu, 2013]. Acestea, comparativ cu piesele din materiale clasice, prezintă câteva avantaje majore: rezistență mecanică crescută, rigidități mărite, rezistență la îmbătrânire, nu sunt corozive, pot fi adăugate straturi în zonele cu solicitări ridicate, dar mai ales, au greutate mult redusă.

În urma analizelor critice privind realizările tehnologice menționate în literatura de specialitate s-a identificat lipsa majoră de *automatizare* a proceselor de înfășurare a fibrelor de carbon în vederea realizării structurilor din materiale compozite. Motivele acestui fapt sunt în principal determinate de costurile ridicate ale materialelor folosite (fibră de carbon, rășina) dar și de tehnologiile de obținere care încă sunt cel mult semiatomate, fiind rigide și pentru producții de unicat sau, în anumite cazuri, pentru serii mici.

În cadrul acest studiu se încearcă soluționarea problematicilor tehnologice de obținere a structurilor compozite, prin identificarea unor metode de automatizare eficiente și rapide la costuri scăzute, în special, prin metoda înfășurării fibrelor de carbon utilizând unul sau mai mulți roboți industriali. De aceea, prin acest studiu se urmărește într-o primă etapă analiza posibilităților de realizare a înfășurărilor într-un mod automatizat, utilizând roboți industriali universali cu șase grade de mobilitate, iar într-o etapă ulterioară îmbunătățirea performanțelor pieselor finale, prin optimizarea parametrilor de proces precum cei de poziționare, tensionare, viteză de înfășurare etc.

Tendențele actuale în robotica industrială este de a se dezvolta sisteme robotizate inteligente (cognitive) care să ia în considerare cumulul de incertitudini care apar în proces, în mediul de lucru dar și în funcționarea roboților. În această direcție se înscriu și cercetările din cadrul

acestei teze de doctorat, care urmăresc, cu precădere, dezvoltarea unui sistem robotizat de obținere a structurilor compozite prin înfășurarea fibrei de carbon în matrițe suport.

1.3 SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRII

Obiectivul principal

Studiul, concepția, dezvoltarea, implementarea, testarea unui sistem automat de înfășurare cu tensionare a fibrei de carbon care implică integrarea a doi roboți industriali colaborativi precum și a unor subsisteme de control a procesului tehnologic de obținere a structurilor compozite.

Obiectivele specifice

- Analiza bibliografică exhaustivă asupra cercetărilor teoretice și experimentale în domeniile tehnologiilor de obținere a structurilor din materiale compozite și a roboților industriali adaptabili pentru procesele tehnologice de înfășurare a fibrei de carbon.
- Modelarea, algoritizarea și programarea procesului de înfășurare a fibrei de carbon prin planificarea, generarea, simularea și implementarea traiectoriilor roboților participanți.
- Modelarea, algoritizarea și programarea procesului de tensionare a fibrei de carbon la înfășurarea acesteia pe trasee complexe (3D) din matrițe suport.
- Concepția, proiectarea, dezvoltarea, simularea și testarea unui dispozitiv de tensionare a fibrei cu un subsistem de control propriu care poate fi integrat în sistemul automat.
- Concepția, proiectarea, dezvoltarea, implementarea, simularea și testarea unui sistem de control și comandă ierarhizat care implementează algoritmi de funcționare și reglare a subsistemelor (inclusiv a roboților) folosind algoritmi de comunicații specifici acestora.
- Studii experimentale cu sistemul integrat în vederea validării funcționalității, atingerii performanțelor de proces, precum și a generalității acestuia prin personalizări pentru aplicații alternative.

1.4 METODOLOGIA ȘI ETAPELE CERCETĂRII

Pornind de la obiectivele impuse și de la analiza critică a realizărilor teoretice și experimentale actuale în domeniul tehnologiilor de obținere a structurilor compozite prin înfășurare automatizată cu roboți industriali, se propune concepția și sinteza unui sistem complet, atât din punct de vedere hardware cât și software, considerând cele mai importante tehnici și tehnologii actuale care să conducă la performanțe ridicate.

În fig. 1.1 se prezintă schema V care stă la baza derulării studiilor și cercetărilor teoretice și experimentale, în care se evidențiază etapele de concepție, modelare, sinteză și testare a subsistemelor componente urmate de integrarea, implementarea și testarea sistemului. Ulterior, platforma rezultată se validează ca sistem, complet integrat, de înfășurare a fibrei de carbon în traseele complexe din matrițe suport, cu scopul declarat de a obține procese de producție flexibile care să respecte toate cerințele de calitate impuse. Astfel, se impune modelarea matematică a proceselor fizice incluse în tehnologiile clasice și care urmează, în cadrul noului sistem, să fie realizate automat.

Pentru obținerea unui sistem automat flexibil se urmărește dezvoltarea unui sistem de conducere ierarhizat bazat pe algoritmi de reglare și comunicație optimi, și cu interfețe utilizator intuitive, prin care se pot introduce informațiile și parametrii impuși și se pot vizualiza rezultate intermediare și finale despre proces.

Pentru realizarea studiilor experimentale se propune restructurarea celulei flexibile de manufacturare (strunjire și frezare) cu doi roboți, existentă în laboratorul de Informatică Industrială Virtuală și Robotică din cadrul Universității Transilvania din Brașov și folosirea

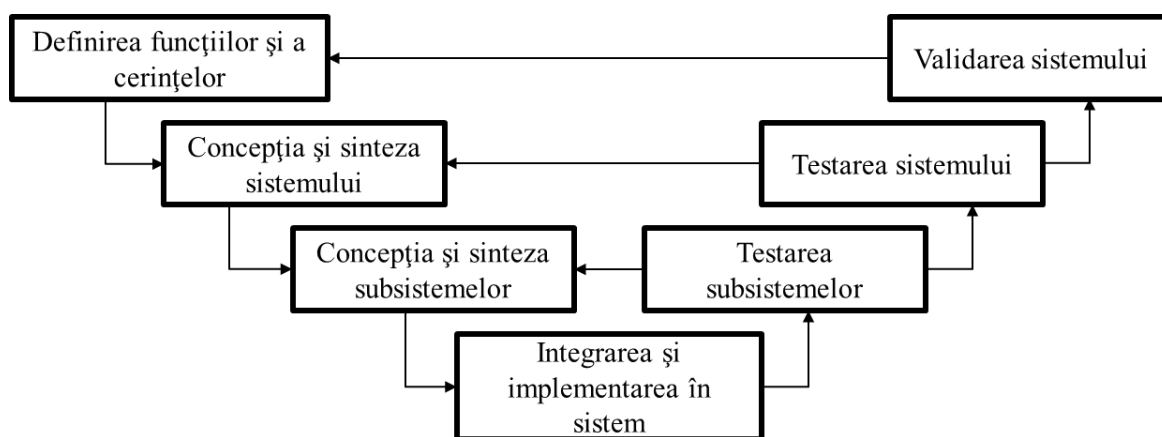


Fig. 1.1 Schema bloc a procesului de dezvoltare a unui sistem tehnologic automat

matrițelor suport utilizate și pentru cercetările experimentale din cadrul tezei de doctorat *Performanțele fizico-mecanice ale pieselor din materiale compozite utilizate pentru coloana de direcție a autovehiculului*, elaborată de dr. ing. Thomas Heitz, de la compania Thyssenkrupp Lichtenstein.

Având în vedere că procesul de înfășurare a fibrei impune tensionarea acesteia se impune concepția unui dispozitiv de tensionare adecvat tehnologiei robotizate pentru structuri complexe (3D).

1.5 STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI DE DOCTORAT

Lucrarea de doctorat este structurată în 8 capitole și 6 anexe.

Teza de doctorat este structurată urmărind etapele consacrate ale cercetării științifice teoretico-experimentale aplicative (fig. 1.1): analiza cercetărilor teoretice, experimentale și aplicative; modelarea și algoritimizarea proceselor fizice; concepția și dezvoltarea de subsisteme; integrarea și implementarea subsistemelor; studii experimentale de validare.

În primul capitol, *Introducere*, se prezintă aspecte generale legate de studiul propus în această teză de doctorat, motivarea alegerii temei, necesitatea acestor studii, obiectivele principal și specifice precum și despre metodologia de cercetare urmărită pentru îndeplinirea acestor obiective.

Capitolul doi, *Structuri din materiale compozite. Tehnologii de obținere*, evidențiază metode curente de obținere a structurilor din materiale compozite, prin depunere sau prin înfășurare, prezentând comparativ pentru fiecare dintre acestea avantajele și dezavantajele bazate pe următoarele criterii: tipul matriței, metoda de aplicare a rășinii, forma fibrelor, tensionarea fibrelor, tăierea/adăugarea fibrei și temperatura rășinii/fibrei. Metoda de obținere a structurilor din materiale compozite abordată, în detaliu, în cadrul acestei teze de doctorat, este asociată procesului de înfășurare a fibrei de carbon în canale ale matriței suport.

În capitolul trei, *Roboți industriali adaptabili pentru procese tehnologice de înfășurare a fibrelor*, se prezintă pentru început roboții industriali universali împreună cu o clasificare a acestora în funcție de structură și posibilitățile de manipulare. Un robot industrial se constituie din sisteme mecanice, electrice, electronice și software pentru care sunt prezentate aspecte funcționale și constructive. În studiile din această lucrare s-a recurs la utilizarea sistemului de programare offline cu pachetul Robot Studio, oferit de către producătorul roboților ABB.

Capitolul patru, *Modelarea procesului de înfășurare robotizată a fibrei*, este dedicat descrierii modelelor procesului de înfășurare a fibrei de carbon cu ajutorul roboților industriali, pornind de la studiile anterioare. Se prezintă procesul general, dar și tipuri distincte de înfășurare robotizată. În acest studiu se propune un sistem de înfășurare robotizat ce presupune ghidarea fibrei cu un cap de înfășurare-tensionare după traiectorie complexă implementate la nivelul controlerului robotului prin puncte succesive pentru care se cunosc coordonatele.

În a doua parte a acestui capitol se prezintă modelul matematic de obținere a efortului din fibra de carbon în punctele traiectoriei punctului caracteristic al robotului de înfășurare. Pentru a obține o *tensionare constantă* a fibrei în structura finală este necesar ca la înfășurare să se tensioneze fibra cu eforturi variabile, mai ales, în zonele curbilinii.

În capitolului cinci, *Sistem robotizat de tensionare și de înfășurare a fibrelor*, se detaliază metodele și dispozitivele specifice utilizate pentru tensionarea fibrelor de carbon în cadrul procesului de înfășurare în canalele unei matrițe suport. Dispozitivul de tensionare propus este format dintr-un subsansamblu de ghidare cu două bacuri ce apăsă controlat fibra - prin intermediul unui subsistem cu un servomotor electric - și conduce la frânarea/eliberarea și, deci tensionarea acesteia. Pentru a aprecia performanțele *sistemului de reglare a acționării servomotorului dispozitivului de tensionare* proiectat și a algoritmului dezvoltat, s-au făcut teste și simulări în mediul virtual, utilizând pachetele Matlab și Simulink.

Capitolul șase, *Sistem integrat cu roboți colaborativi pentru înfășurarea fibrelor structurilor compozite (SROC-ÎNF)*, evidențiază implementarea rezultatelor descrise în capitolele precedente. În prima parte se descrie structura sistemului de înfășurare integrat la nivel hardware. Sistemul propus integrează doi roboți industriali, unul pentru înfășurarea fibrei prin intermediul unui cap de înfășurare cu dispozitiv de tensionare a fibrei și celălalt pentru manipularea matriței, în cadrul aceleiași platforme de comandă și control.

Pentru dezvoltarea sistemului, s-au utilizat diferite medii de programare, simulare și comunicație, dintre care cele mai importante sunt: software-ul pentru programarea roboților, RAPID din platforma Robot Studio; C#, în special, pachetul PC SDK de pe platforma de tip SCADA pentru dezvoltarea controlerului master; Visual Basic, pentru achiziția și transferul de date de la senzorul de forță; mediul Arduino pentru programarea controlerului de comandă a servomotorului electric de tensionare; controlerul PCI care colectează informațiile de la senzorul de forță

În capitolul șapte, *Studii experimentale*, se prezintă, concepția, proiectarea și dezvoltarea mediului de testare a sistemului dezvoltat. Pentru a putea realiza teste reale în vederea verificării funcționalității subsistemelor, dar mai ales, a sistemului integrat, au fost utilizate și rezultatele testelor realizate prin simulări în modelul virtual.

În prima fază s-au realizat teste experimentale de înfășurare cu tensionare cu un robot. Obiectivul principal al acestor teste este de a analiza influența forțelor de frecare din subsistemele de alimentare și impregnare a fibrei, asupra procesului de tensionare, și de a determina valorile nominale ale parametrilor de tensionare. Testele experimentale cu doi roboți, unul de înfășurare cu tensionare controlată a fibrei de carbon și altul de manipulare, de asemenea, automată a matriței suport, au urmărit aspecte privind procesul de înfășurare prin colaborare a roboților precum și determinarea parametrilor regulatorului de poziționare a servomotorului de tensionare și a regulatorului de tensionare a fibrei de carbon.

În urma testelor experimentale descrise în capitolul șapte și a rezultatelor obținute se evidențiază că SROC-ÎNF poate fi folosit în practica industrială.

Capitolul opt, *Concluzii, contribuții proprii, valorificarea rezultatelor și noi direcții de cercetare*, sintetizează cercetările realizate și rezultatele obținute în perioada dezvoltării acestei teze de doctorat, evidențiind contribuțiile proprii originale, diseminarea rezultatelor științifice obținute, prin publicații și participări la conferințe, și expune direcții viitoare de cercetare.

2. STRUCTURI MECANICE DIN MATERIALE COMPOZITE. TEHNOLOGII DE OBȚINERE

2.1 ASPECTE GENERALE

Tehnologiile de obținere a *structurilor mecanice din materiale compozite* sunt în prezent într-o continuă dezvoltare și adaptare la cerințele actuale. Obiectivul principal al acestei adaptări continue este creșterea performanțelor, la costuri și consumuri de energie reduse. Acest proces se dezvoltă în două direcții, prima, implică robotizarea proceselor tehnologice de producție și a doua, scăderea consumurilor de materiale și de energie ale proceselor de obținere.

Structurile din materiale compozite se pot obține, în mod clasic, prin *două procedee de modelare* a fibrelor, prin depunere (placement) [Yan, 2014], care utilizează fibră sub formă de bandă sau țesătură, sau prin înfășurare (winding) [Mathon, 2014; Blanco, 2015], care folosește fibră sub formă de fir.

În cazul procesului de obținere a materialelor compozite prin înfășurare, din studiile precedente [Sbanca, 2014; Sbanca, 2015], s-a observat că cei mai importanți parametri sunt legați de traiectorie, viteza de înfășurare, dar mai ales de tensionarea fibrei în timpul procesului tehnologic de înfășurare [Gale, 2012; Karpuz, 2005].

2.2 COMPONENTELE ȘI TEHNOLOGIILE DE OBȚINERE A STRUCTURILOR DIN MATERIALE COMPOZITE

Structurile compozite sunt realizate prin integrarea a minim două componente principale, fibra de carbon și matricea polimerică (rășină). Materialele compozite avansate, utilizate, spre exemplu, în industria aerospațială au structuri specifice cu rețele de ranforsare a fibrelor. Fibrele din materialele compozite pot fi: fibră de sticlă [Sguassero, 2012], Kevlar [Potter, 1999] sau în cele mai frecvente cazuri fibră de carbon [Dietrich, 2012]. Fibrele de carbon sunt așezate în structuri complexe pentru a rezulta rezistențe și rigidități mărite.

Matricea polimerică (rășină) are rolul de a realiza o structură compactă și de a transfera încărcarea de la o fibră la alta (fig. 2.1). De obicei, aceasta are un coeficient ridicat de dilatare termică comparativ cu fibra.

Procedeele de utilizare (integrare) a fibrei de carbon pentru obținerea structurilor din materiale compozite pot fi prin înfășurare sau prin depunere. În tab. 2.1 se prezintă principalele asemănări și deosebiri între cele două procedee de obținere a structurilor din fibră de carbon.

În ultimul timp, procedeele clasice, prin aplicare manuală a fibrei de carbon, utilizate de peste 50 de ani [Vaughan, 1974; Mazumdar, 1994], au fost înlocuite cu procedee de depunere s-au înfășurare deoarece prin metode manuale nu există un *control al procesului* și este un mare *consumator de timp*. Așezarea și depunerea benzilor de fibră de carbon s-a dezvoltat începând cu anii 1970-1980, mai ales, ca soluție de utilizare a fibrelor preimpregnate. Structurile realizate prin procedeul depunerii de fibră au avantajul că permit tăierea materialelor și adăugarea de material, dacă este necesar, prin extindere, prin încrucișare sau lipire. Din acest motiv, pierderile de material, în mod normal, pentru structurile realizate prin depunere, sunt mult mai mici.

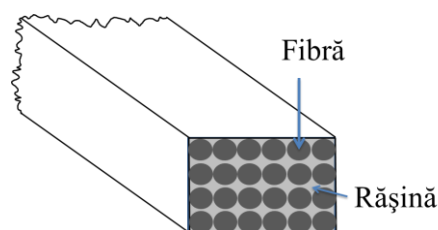


Fig 2.1 Structură din materiale compozite

Tab. 2.1. Comparație a tehnologiilor de obținere a structurilor din materiale compozite

Procedeele Criteriul	Prin înfășurare	Prin depunere
Tipul matriței	Matriță de formare utilizată pentru ghidare inițială	Matriță de formare utilizată până se obține produsul finit
Metoda de aplicare a rășinii	Baie de rășină sau fibre preimpregnate	Fibre preimpregnate
Forma fibrelor	Fire, sau benzi înguste	Benzi late sau țesături
Tensionarea fibrei	Fibra este continuu tensionată în timpul înfășurării și nu este tăiată până la final	Fibrele nu sunt tensionate, fiind depuse pe o suprafață și compactate prin apăsare cu forță mărită
Taierea/adăugarea de fibră	Fibrele nu pot fi tăiate	Fibrele pot fi tăiate și adăugate
Temperatură rășină/fibră	Fibra preimpregnată este încălzită apriori procesului iar rășina din baie este la temperatura camerei	Fibra preimpregnată cu rășină se găsește la temperatura camerei

2.2.1 TEHNOLOGII DE OBȚINERE A STRUCTURILOR COMPOZITE PRIN DEPUNERE

Depunerea fibrei, cu procedee automatizate, este utilizată la fabricarea multor structuri compozite din industria aeronautică. Aceste procedee presupun, de obicei, așezarea fibrelor în țesături încrucișate, pe straturi [Bundy, 2005].

De-a lungul timpului s-au dezvoltat sisteme automatizate de depunere a fibrei (AFP- Automated Fiber Placement), dedicate producției de structuri din materiale compozite în serie mare. Există deja procese tehnologice de depunere a fibrei de carbon care se realizează cu ajutorul roboțiilor industriali paraleli, dar și seriali [Gan, 2015; Aized, 2011].

De obicei, procesele de depunere automatizate pornesc de la existența unor fâșii de fibră de carbon încrucișate, prefabricate. Acestea sunt supuse unui proces de tăiere în funcție de suprafața dorită. După ce fâșiile sunt tăiate, sunt transferate în camere curate, fără impurități, unde sunt plasate pe o matriță de bază (fig. 2.2) [Kozaczuk, 2016].

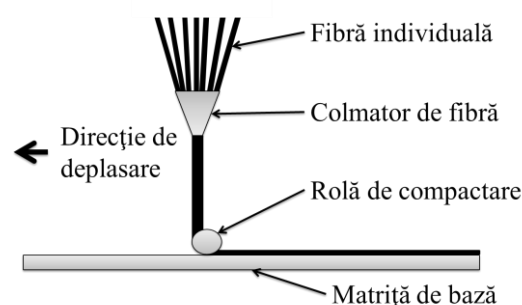


Fig. 2.2 Procesul de depunere a fibrei prin compactare

2.2.2 TEHNOLOGII DE OBȚINERE A STRUCTURILOR COMPOZITE PRIN ÎNFĂȘURARE

Obținerea structurilor compozite prin *înfășurarea fibrei* este o tehnică din ce în ce mai mult utilizată în producția de piese auto și aeronautice. Acest procedeu, în general, presupune înfășurarea continuă a fibrelor într-o matriță fixă sau rotitoare, fiind utilizat în producția de structuri compozite precum rezervoare, cilindrii, tuburi, țevi etc. Această tehnologie este considerată una dintre cele mai bune, conducând la costuri de producție reduse, mai ales, pentru piese circulare [Geiger, 2017].

Obiective, precum realizarea de loturi mici de produse compozite sau cu flexibilitate mare a acestora, nu pot fi atinse cu tehnologiile clasice de înfășurare [Steward, 2009]. De aceea, s-au dezvoltat procedee noi de înfășurare, facilitate fiind și de inovațiile aduse de tehnologiile automatizate și robotizate. Astfel, au apărut studii și experimente din ce în ce mai diverse [Xiao, 2011; Jia, 2011], prin procedee automatizate precum *Fly Winding* sau *Spindle Winding*, preponderent implementate pentru realizarea bobinajelor.

2.3 SISTEME DE ÎNFĂȘURARE A FIBREI PENTRU OBȚINEREA STRUCTURILOR COMPOZITE

2.3.1 STRUCTURA GENERALĂ

Înfășurarea fibrei pentru obținerea structurilor compozite se poate face cu fibra umedă (preimpregnarea fiind integrată în același proces), numită și *wet winding*, sau cu fibra uscată, numită și *dry winding* [Mathon, 2014; Mutasher, 2012].

În cazul înfășurării fibrei umede, după ce fibra uscată este desfășurată de pe rola de alimentare este trecută printr-o baie de rășină, proces numit impregnare. Rola de alimentare este plasată pe un suport care permite desfășurarea liberă a fibrei. În continuare, înainte de a fi trecută prin capul de înfășurare, fibra traversează un dispozitiv de tensionare automat sau cu reglare manuală. Capul de înfășurare în timpul procesului de înfășurare pe o matriță rotativă are o mișcare de translație verticală asigurând o traiectorie definită.

Tehnologia de înfășurare cu fibră umedă este preferată celei cu fibră uscată deoarece costurile sunt mai mici. În plus, se poate realiza un control de calitate a impregnării fibrei mai eficient și totodată nu este necesar un stoc de material preimpregnat care poate expira.

Pornind de la faptul că sistemele tehnologice de înfășurare cu un singur robot, prezentate în literatura de specialitate [Pires, 2007; Polini, 2005], încă nu s-au conturat ca tehnologii de referință, în cadrul acestei teze de doctorat, s-a propus, în premieră, dezvoltarea de sisteme cu doi roboți [Sbanca, 2014]. Astfel, s-a adoptat varianta, inspirată de procesul de înfășurare manual cu două mâini, în care un robot manipulează spațial matrița, iar cel de-al doilea, capul de înfășurare a fibrei.

2.4 DISPOZITIVE DE TENSIONARE A FIBREI

În cele mai multe cazuri pentru ca *tensionarea fibrei de carbon* în timpul înfășurării să fie la valori impuse se utilizează dispozitive de tensionare bazate pe *control în forță* [Vargas, 2004; Warren, 2011]. Astfel, sistemele robotizate cu tensionare controlată, se pot considera o combinație între un sistem de înfășurare fără controlul forțelor și un sistem de asamblare controlată [Sbanca, 2014b].

În funcție de poziția dispozitivelor de tensionare în cadrul schemei de înfășurare există trei variante de implementare, fiecare dintre acestea fiind aplicabile, atât pentru procese de înfășurare cu fibră umedă, cât și pentru cele cu fibră uscată.

Dispozitivele de tensionare cu role întinzătoare sunt poziționate între subsistemul de derulare din rola de alimentare și capul de înfășurare (fig. 2.8). Două dintre role au poziție fixă, iar cea intermediară are o poziție mobilă determinată de un element elastic (arc elicoidal de tracțiune).

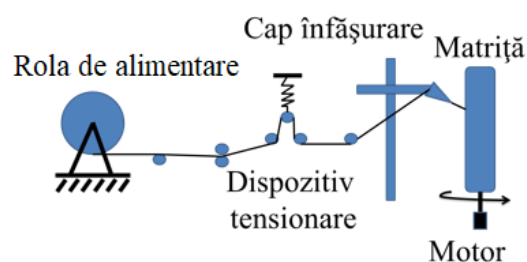


Fig. 2.8 Tensionarea fibrei cu dispozitiv cu role întinzătoare

Dispozitivele de tensionare cu frânare la alimentare, de obicei, sunt integrate în subsistemul de derulare din rola de alimentare. Astfel, tensionarea se realizează prin frânarea controlată a motorului electric care acționează asupra rolei de alimentare (fig. 2.9). Acest sistem are dezavantajul efortului de tensionare variabil în funcție de diametrul cilindrului rolei cu fibră care scade pe măsura derulării acesteia.

Dispozitivele de tensionare integrate în capul de înfășurare, des folosite în construcția echipamentelor de înfășurare industriale, realizează tensionarea fibrei aproape de locul de așezare a acesteia în matriță. În cadrul soluției din fig. 2.10, tensionarea se realizează prin apăsarea capului de înfășurare pe matriță, fibra fiind presată pe pachetul de fibră depus anterior.

În ultima perioadă de timp s-au conceput și dezvoltat dispozitive de tensionare cu controlul efortului din fibră, cu un senzor de forță aflat pe parcursul fibrei între rola de alimentare și matriță, iar apoi bazat pe valoarea măsurată, cu un controler dedicat, tensionarea este ajustată [Sbanca, 2018].

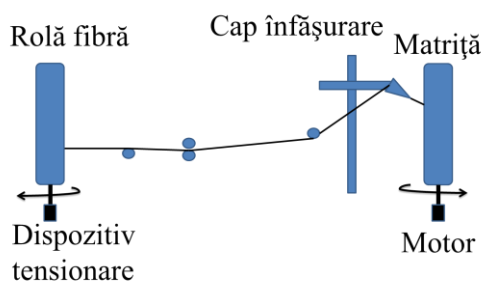


Fig. 2.9 Tensionarea fibrei cu dispozitiv de frânare la alimentare

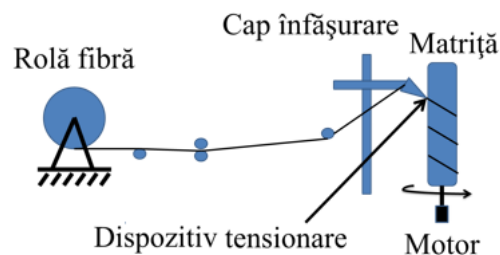


Fig. 2.10 Tensionarea fibrei cu dispozitiv integrat în capul de înfășurare

2.5 CONCLUZII

Tehnologiile de obținere a structurilor (pieselor) compozite cu fibră înfășurată, actuale încă nu asigură calități superioare la costuri rezonabile, mai ales, în cazurile producției în cantități mici. Una dintre direcțiile de diminuare a acestui dezavantaj presupune concepția și dezvoltarea de tehnologii robotizate care să asigure flexibilitate mărită a producției, chiar și în cazul producției de tip unicat. Sistemele robotizate de înfășurare a fibrei au la origine sistemele robotizate de bobinare a motoarelor electrice, care au fost perfecționate și adaptate cerințelor de înfășurare cu fibră.

Pentru a realiza structuri din materiale compozite cu fibră înfășurată de calitate superioară, se impune urmărirea continuă a unor parametri de proces, precum: densitatea, temperatura, dar, mai ales, forța de tensionare a fibrei de carbon. Dezvoltarea și implementarea unor sisteme de tensionare a fibrei de carbon au condus la creșterea stabilității întregului proces de înfășurare a fibrei și la avantaje precum reducerea costurilor cu producție [Jiao, 2017], pierderi de materiale mai mici [Liu, 2017], creșterea productivității [Geiger, 2017] și, nu în ultimul rând, creșterea calității [Toptas, 2017].

3. ROBOȚI INDUSTRIALI ADAPTABILI PENTRU PROCESE TEHNOLOGICE DE ÎNFĂȘURARE A FIBRELOR

3.1 ASPECTE GENERALE

De la începuturile existenței sale, omul a căutat să îmbunătățească performanța muncii folosind unelte și dispozitive, care în timp, au devenit, din ce în ce mai ingenioase. Ca urmare, a revoluției industriale, automatizarea proceselor industriale a condus la ușurarea considerabilă a muncii omului prin degrevarea de activități repetitive.

Robotul industrial a apărut în mod firesc ca rezultat al limitărilor de flexibilitate ale sistemelor automatizate, mai ales, legate de nivelul de intervenție al operatorului uman în procesul de producție. În evoluția echipamentelor și sistemelor tehnologice de prelucrare și de asamblare cu cerințe înalte de calitate și productivitate, robotul industrial este considerat ca fiind un sistem complex care poate să asiste sau să înlocuiască, activitățile întreprinse de operatorul uman în cadrul proceselor de producție și al serviciilor.






În acest capitol, se prezintă o sinteză a principalelor studii teoretice și experimentale realizate în robotică, cu scopul de a se evidenția problematicile actuale necesar a fi rezolvate, în special, modul de utilizare a roboților industriali în mod colaborativ în cadrul proceselor de înfășurare a fibrelor pentru obținerea de structuri compozite.

3.2 CLASIFICAREA ROBOȚILOR INDUSTRIALI FICȘI

Federația Internațională de Robotică (IFR), în conformitate cu ISO 8373, a stabilit în anul 1997 clasificarea după structura constructivă a roboților pe categoriile de roboți ficși (tab. 3.1). Roboții cei mai utilizați în aplicațiile industriale sunt roboții cu braț articulată.

Luând în considerare *nivelele inteligenței sistemelor de conducere* se evidențiază șase grupe de roboți. Roboți manuali, reprezentați de exoscheletele de manipulare, acționate

Tab. 3.1 Clasificarea roboților ficși în funcție de structura mecanică

Roboți	Structura	Exemplu
Cartezieni	Trei cuple de translație	
Cilindrici	Două cuple de translație și una de rotație	
Sferici	Două cuple de rotație și una de translație	
Articulați	Trei cuple de rotație	
Paraleli	Trei - șase cuple de translație și/sau de rotație	

în exclusivitate de om. Roboți master-slave, reprezentați de două structuri similare, una principală care execută aceeași acțiune ca cea secundară, care are rol de master. Roboți secvențiali, care operează conform unor proceduri în condiții inițiale și finale stricte, predefinite. Roboții programați, cu precădere, reprezentați de roboții industriali care execută operații conform unor programe deterministe. Tele-roboții sunt comandați de la distanță de către un operator uman prin diferite procedee (de contact, vizuale, haptice etc.). În ultima perioadă de timp, ca urmare a realizărilor în domeniul inteligenței artificiale, s-au conceput și dezvoltat roboți inteligenți caracterizați de posibilități cognitive și de decizie comportamentală, bazate pe capacitățile sale de sesizare și recunoaștere.

3.3 FUNCȚIILE ROBOȚILOR INDUSTRIALI

Funcțiile pe care le pot îndeplini roboții industriali se pot clasifica, în principal, dependent de aplicațiile și operațiile pe care le efectuează. Astfel, cea mai răspândită este *funcția de manipulare*. La rândul ei, aceasta poate fi pentru asamblare sau pentru transport, mai ales, în cazul sistemelor multi robot. Cu o aplicabilitate mai redusă, sunt roboții care pot desfășura numeroase *funcții de procesare/prelucrare* (de sudură, de lipire, de vopsire, de tăiere, de deformare etc.). Tot în această categorie a funcțiilor de procesare/prelucrare, poate fi încadrată și *funcția de înfășurare a fibrelor* (încă neconsacrată în practica industrială). De obicei, aceste funcții sunt implementate ca aplicații care implică celulele robotice, care asigură întregul mediu pentru realizarea sarcinilor impuse.

3.4 STRUCTURA GENERALĂ A ROBOȚILOR INDUSTRIALI

Roboții industriali, ca dispozitive mecanice controlate, au o structură tipică, compusă, în general, din patru sisteme [Koren, 1985]: mecanic, de acționare, senzorial și de control și comandă (fig. 3.2). Pe de altă parte, structurile acestora presupun integrarea funcțională a părților hardware (mecanic, electric și electronic) și software (de programare) [Mogan, 2003].

Componenta software este compusă din sistemul de operare al controlerului, mediul de programare pentru dezvoltarea și simularea aplicațiilor, programele de calibrare și testare etc. Fiecare dintre aceste componente au funcții și sarcini de realizat deterministe, astfel încât la rulare pot realiza acțiuni independente de intervenția omului.

Sistemul mecanic de manipulare sau manipulatorul este compus din cuple cinematice înseriate sau în paralel care sunt acționate de către motoare electrice, pneumatice sau hidraulice, prin intermediul sistemului de acționare, ce oferă roboților capabilități de mișcare și de intervenție în mediul de lucru.

Sistemul de comandă și control cuprinde partea electronică, calculatorul și programe

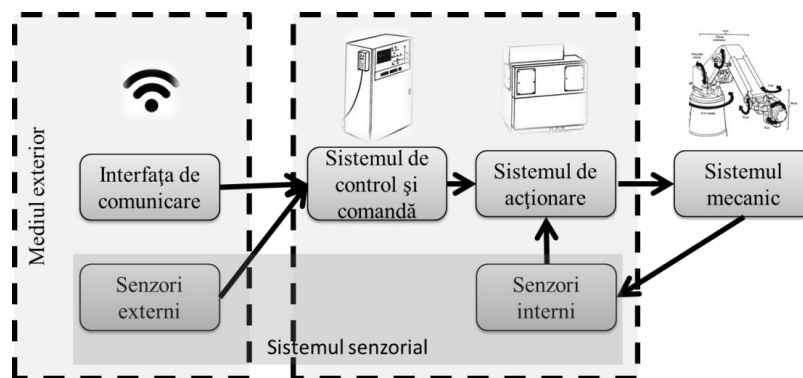


Fig. 3.2 Schema bloc generală a unui robot industrial

de control și comandă a mișcărilor, a cuplelor cinematice, precum și a acțiunilor pe care robotul trebuie să le realizeze. Programul de control este oferit de către producătorul robotului și are la bază funcții de control a mișcării fiecărei articulații a manipulatorului. În cazul în care este utilizat un limbaj de programare evoluat, controlerul robotului conține și un procesor de limbaj care interpretează acțiunile programate și transmite instrucțiunile cerute de către programul de comandă, direct către sistemul de acționare care le transformă în acțiuni ale robotului.

3.4.1 SISTEMUL MECANIC

3.4.1.1 STRUCTURA GENERALĂ

Componentele principale ale sistemului mecanic al unui robot industrial sunt platforma fixă, de susținere a robotului, dispozitivul de ghidare, compus din mecanismul generator de traiectorie și mecanismul de orientare și dispozitivul de prehensiune (fig 3.4). În practică, se pot identifica numeroase structuri cinematice care asigură diferite funcționalități [Galabov, 2013] și care se pot introduce. În plus, se întâlnesc și structuri cinematice redundante, cu mai mult de șase grade de libertate, care asigură mișcări mai complexe, mai ales, pentru acțiuni de ocolire a obstacolelor și/sau de acces în spații greu accesibile.

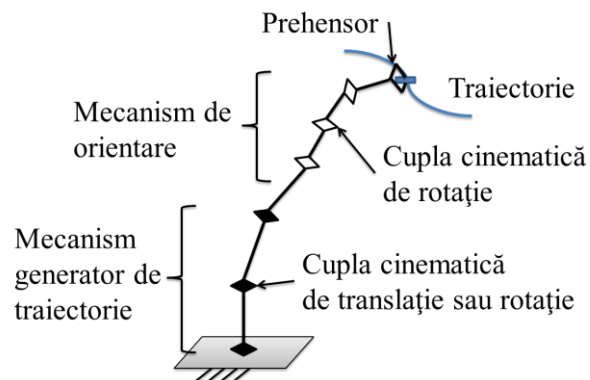


Fig. 3.4 Structura sistemului mecanic al unui robot industrial

3.4.1.2 CINEMATICA DIRECTĂ ȘI INVERSĂ

Bazele proiectării roboților industriali sunt reprezentate de o abordare funcțională asupra structurii și sintezei dimensionale a mecanismelor, conform cărora structura roboților este construită prin implementarea unui lanț cinematic cu funcționalitate dedicată, analizat și comandat de sistemul de control și comandă.

Analiza cinematică a mecanismului de ghidare se face pentru determinarea, pe de o parte, a posturilor și vitezelor punctului caracteristic al efectorului (prehensurului) și, pe de altă parte, a posturilor și vitezelor cuplelor cinematice.

Așadar, în tab. 3.3 se evidențiază corespondențele dintre parametrii și datele cunoscute și cele obținute, personalizate pentru cazul roboților industriali articulați, care apar la analizele cinematice *directă* și *inversă*.

Tab. 3.3 Comparație cinematică directă și inversă

Criteriaul	Cinematica directă	Cinematica inversă
Parametri cunoscuți/obținuți	Unghiuri, viteze / poziție, orientare	Poziție, orientare / unghiuri, viteze
Date de intrare	Dimensiunile elementelor, parametri cuplelor	Dimensiunile elementelor, traiectoria robotului
Date obținute	Poziția și orientarea efectorului în fiecare punct	Unghiurile și vitezele fiecărei cuple

3.4.2 SISTEMUL DE ACȚIONARE

Sistemul de acționare al unui robot industrial, dependent de tipul acestuia și de domeniul în care acesta este utilizat, asigură energia și forțele/momentele necesare pentru a executa mișcări și intervenții în spațiul de lucru. Deoarece, articulațiile roboților sunt mobile, sistemul de acționare aplică asupra acestora forțe și momente de torsiune astfel încât robotul să rămână rigid, chiar și atunci când este în stare fixă (motoarele sunt inative).

Sursele de energie posibile pentru acționarea roboților, în general, sunt electrică, hidraulică sau pneumatică. În construcția roboților și microroboților se întâlnesc acționări electrice [Aron, 2009], acționări hidraulice [Lischinsky, 1999; Sirouspour, 2001], acționări pneumatice [Palok, 2016; Todorov, 2010] sau acționări mixte (electro-hidraulică; electro-pneumatică; pneumo-hidraulică) [Vidican, 2009]. Cei mai întâlniți roboți industriali, în acest moment, sunt cu acționare electrică, asigurând compatibilități mărite cu sistemele electronice actuale. Componentele reprezentative ale unui sistem de acționare electric sunt reprezentate de servomotor, traductorul de poziție/viteză și regulatorul (subsistemul de control și comandă propriu).

3.4.3 SISTEMUL SENZORIAL

Sistemul senzorial are rolul determinării valorilor unor parametri funcționali sau de stare, și, în funcție de nivelul de integrare, poate avea și funcții de prelucrare și de comunicare mai simple sau mai complexe.

Senzorii interni servesc la obținerea unor date asociate unor parametri funcționali, interni robotului, precum poziția relativă a componentelor cuplelor cinematice, vitezele și accelerațiile liniare/unghiulare, anomaliile elementelor sistemului cinematic, prin intermediul unor senzori de poziție, viteză, forță/cuplu, dar și sub formă de accelerometre [Hongya, 2007; Bozma, 2012].

Senzorii externi sunt utilizați pentru culegerea de informații despre mediul de lucru și asupra interacțiunii robot/mediu. Acești senzori sunt utilizați pentru identificarea și stabilirea tipului, poziției, orientării sau a altor proprietăți ale obiectelor (obstacolelor) din mediu precum și, uneori, la determinarea forțelor de interacțiune robot-mediu.

3.4.4 SISTEMUL DE CONTROL ȘI COMANDĂ

Controlerul unui robot industrial reprezintă interfața dintre comenzile impuse/transmise de operatorul uman și acțiunile rezultate, ca urmare, a execuției acestor comenzi de către componentele hardware (mecanice și electrice) sub controlul componentelor software (programate). Misiunea lui este, pe de o parte, de a controla cinematica (mișcarea) și intervenția robotului și, pe de altă parte, de a oferi operatorului informații legate de stările de execuție a comenzilor. Pentru îndeplinirea acestei misiuni, controlerul asigură funcții precum: comunicația cu utilizatorul, suport pentru programare, administrarea programelor, analiza programelor, urmărirea articulațiilor pentru mișcarea programată, modificarea pozițiilor axelor (prin intermediul senzorilor sau comenzilor externe), generarea de semnale pentru echipamentele periferice (auxiliare), comunicația cu alte subsisteme perirobotice, asigurarea și păstrarea condițiilor de siguranță etc.

3.4.4.1 STRUCTURA GENERALĂ A UNUI CONTROLER

La baza unui sistem de control și comandă stă un procesor, numit controler robot, care comunică prin intermediul magistralelor interne cu controlerele de comunicație, de acționare și de gestionare semnale de intrare-ieșire. Controlerul robot menține legături permanente cu

interfața pentru senzorii avansați, dar și cu memoria internă a controlerului, care este divizată în trei secțiuni utilizator, program și de sistem.

Executarea corectă a mișcării prehensorului este încredințată sistemului de control care furnizează comenzi articulațiilor manipulatorului. Deplasarea prehensorului robotului poate fi necondiționată dacă nu există contact fizic între prehensor și mediu, sau constrânsă, dacă apar forțe de contact între acestea [Sbanca, 2014b].

3.4.4.2 TIPURILE SISTEMELOR DE CONTROL

În fig. 3.8 se prezintă tipurile schemelor de control cu interacțiune, unde se evidențiază două direcții, controlul în forță indirect și control în forță direct.

Controlul în forță direct se obține prin controlul mișcării, fără o legătură explicită cu bucla de feedback în forță, în schimb în cazul *controlului în forță indirect* se caută menținerea forței de contact la o valoare dorită, corelat cu bucla de feedback în forță sau de poziționare [Afonso, 2007].

Odată cu adoptarea unei strategii de control în forță direct, reglarea forțelor de interacțiune are prioritate în detrimentul controlului poziției punctului caracteristic al prehensorului și deci, pot apărea erori de la traiectoria impusă [Pires, 2007b]. Cu toate acestea, se recuperează precizia controlului în poziție în timpul deplasărilor necondiționate de controlul în forță.

Acest obiectiv poate fi obținut doar dacă este disponibilă o descriere detaliată a mediului de lucru [Namvar, 2005; Sbanca, 2014b; Shikany, 2014], fapt care în practică este greu de îndeplinit.

3.4.5 PROGRAMAREA ROBOȚILOR

Limbajele de programare ale roboților care descriu sarcini la nivelul articulațiilor sau coordonatelor operaționale sunt de nivel inferior cu legături directe și cu dispozitive hardware (limbaje de programare orientate pe mișcare), spre deosebire, de cele care descriu sarcini bazate pe obiecte sau obiective care sunt de nivel superior, integrează elemente de inteligență artificială și rezolvă probleme complexe (de asamblare automată, de conducere adaptivă, de coordonare a obiectivelor etc.)

De-a lungul timpului, în funcție de asocierea cu structurile robotului sau de comunicarea directă sau indirectă cu acestea, programarea roboților s-a dezvoltat în două direcții: programarea online, cu comunicare directă cu structurile robot, și programarea offline, în afara mediului robotului și, deci, cu comunicare indirectă cu acesta.

Programarea online manuală prin instruire (învățare), de ex. folosind dispozitivul TeachPendant este aproximativă și consumatoare de timp [Bottazzi, 2006; Haage, 2010; Wahl, 2002]. Această metodă prezintă numeroase dezavantaje, printre care, timpii măriți, fiind necesare multe iterații, robotul trebuie să fie disponibil, operatorul nu are un feedback vizual și operatorul uman trebuie să aibă abilități avansate de operare cu comenzile manuale. În industrie acest tip de programare poate fi justificat economic doar pentru producții de serii foarte mari.

Programarea offline presupune utilizarea unui calculator gazdă în timp ce robotul poate executa alte acțiuni [Ionescu, 2008]. Uneori, chiar dacă sistemul de control și comandă

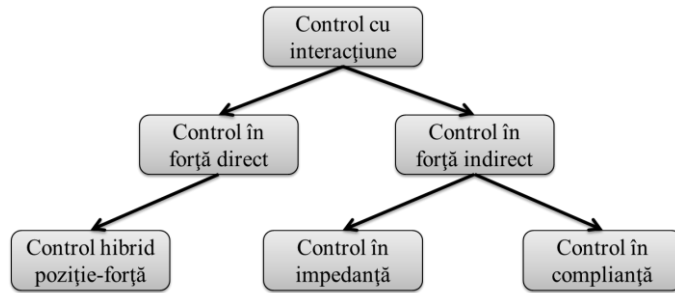


Fig 3.8 Tipuri de control cu interacțiune

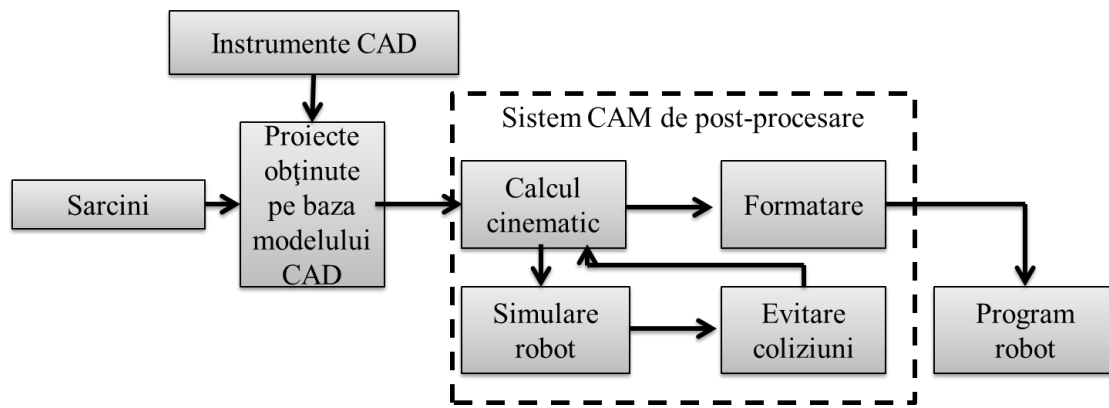


Fig. 3.16 Schema bloc funcțională a programării offline, bazată pe medii CAD/CAM

al robotului este utilizat, programarea poate fi considerată, de asemenea, offline, programele sunt create cu ajutorul calculatorului gazdă, fără a fi necesară accesarea robotului.

În cazul programării offline a proceselor tehnologice robotizate, pentru a putea fi utilizate datele de la senzori pentru generarea traiectoriilor, trebuie introduse date legate de tipul și proprietățile mediului de lucru (fig. 3.16).

În cadrul acestei teze de doctorat pentru programarea offline s-a recurs la utilizarea sistemului Robot Studio, dezvoltat de către compania ABB.

3.5 ROBOȚI INDUSTRIALI COLABORATIVI

Chiar dacă un singur robot poate realiza o sarcină cerută, implementarea sistemelor cu mai mulți roboți este de preferat, atâta timp cât aceasta, pe de o parte, conduce la o îmbunătățire majoră a produsului, precum și, pe de altă parte, la diminuarea complexității sistemelor perirobotice. În sistemele cu mai mulți roboți distribuția sarcinilor, este văzută ca o problemă de asignare optimă a sarcinilor fiecărui robot, în vederea maximizării performanței generale, luând în considerare performanțele la nivel individual.

3.5.2 METODE DE COLABORARE

Colaborarea roboților, în sens larg, presupune realizarea unor acțiuni de coordonare a mai mulți participanți, cooperatori, angajați într-o activitate dată [Rojas, 2014]. Colaborarea între roboți este, de obicei, necesară în sisteme de producție flexibile sau medii complexe de muncă. În particular, colaborarea se aplică și când obiectele de manipulat sunt prea mari (lungi) sau prea grele, un singur robot nefiind suficient, se folosesc doi sau mai mulți manipulatori [Schmitt, 2012; Sbanca, 2014b].

Metoda master-slave de colaborare între roboți este adecvată pentru manipularea obiectelor rigide (fig. 3.19). Traiectoria de manipulare este generată de către robotul master. Robotul slave urmărește traiectoria punctului caracteristic asociat prehensorului robotului master folosind, în cele mai multe cazuri, un senzor pentru măsurarea forței. Astfel, robotul master este controlat în poziție, cu scopul îndeplinirii traiectoriei impuse, iar robotul slave este controlat în forță și poziție cu scopul

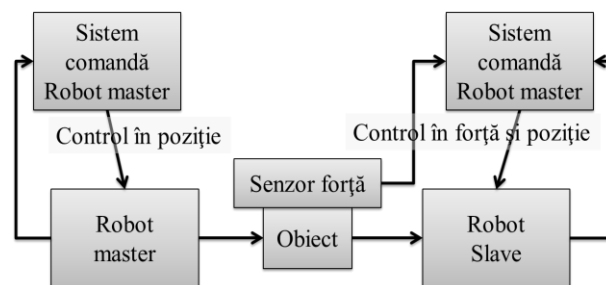


Fig. 3.19 Colaborarea master-slave pentru manipularea obiectelor rigide

menținerii posturii obiectului de manipulat.

3.5.3 PROGRAMAREA ROBOȚILOR COLABORATIVI

Primul pas în vederea programării roboților industriali colaborativi este reprezentat de verificarea prin simulare a traiectoriei planificate într-un spațiu de realitate virtuală sau modelat 3D, folosind un pachet CAD, precum Robot Studio. În urma verificării și, eventual corectării traiectoriei, se elaborează programul de mișcare folosind un sistem grafic interactiv evoluat [Veiga, 2013]. Mai nou, sistemele de comunicare imagistică pot fi completate cu module de comunicare prin voce [Pires, 2005; Haage, 2010] sau prin gesturi [Duguleana, 2011; Neto, 2010; Stoica, 2011].

Și pentru programarea și conducerea proceselor de înfășurare cu roboți a firelor (sârmelor, cablurilor), pentru a trece de la concept la implementări practice, se impune parcurgerea etapelor algoritmului din fig. 3.22 și, pentru crearea traiectoriilor, rezolvarea modelului matematic asociat procesului. În cazul roboților industriali de înfășurare, modelul matematic de generare a traiectoriilor, ia în considerare și formele obiectelor, astfel încât să se evite coliziunile cu acestea și/sau cu matrița suport [Zacharia, 2013].

În cadrul studiilor de înfășurare a firelor, realizate în această lucrare, s-a utilizat, în etapa de testare a conceptului, mediul de simulare Robot Studio, care a permis includerea în mediul de simulare a cvasitoate componentele care influențează funcționarea în mediul real.

Prin intermediul simulărilor se pot realiza, în plus, pe de o parte, calibrări ale sistemelor cu unul sau mai multi roboți [Zhao, 2010; Garcia, 2005] și, pe de altă parte, prototipuri ale proceselor, din punct de vedere al traiectoriilor, cu luarea în considerare și a informațiilor de la senzori [Chabal, 2005; Ata, 2007; Girbacia, 2011].

3.6 SISTEME SENZORIALE EXTERNE ȘI DE COMUNICAȚII

Performanțele aplicațiilor cu celule robotizate se pot îmbunătăți și prin folosirea de senzori externi cu performanțe ridicate. Aceștia au rolul principal de a măsura una sau mai multe proprietăți (mărimi fizice) ale obiectelor din mediul de lucru și, în funcție de nivelul de integrare, de a îndeplini diferite sarcini auxiliare (de procesare semnale, de stocare etc.) În general, senzorii externi actuali, ca elemente pentru transformarea mărimii de intrare (preluată din mediu) într-un semnal electric, au și circuite pentru interpretarea semnalelor, precum și, eventual, pentru analiza informațiilor.

3.6.1 SISTEME SENZORIALE EXTERNE

În fig. 3.23 se prezintă o clasificare a senzorilor externi, criteriul de bază făcând referire la existența/inexistența contactului direct cu obiectele din mediu. Prin intermediul

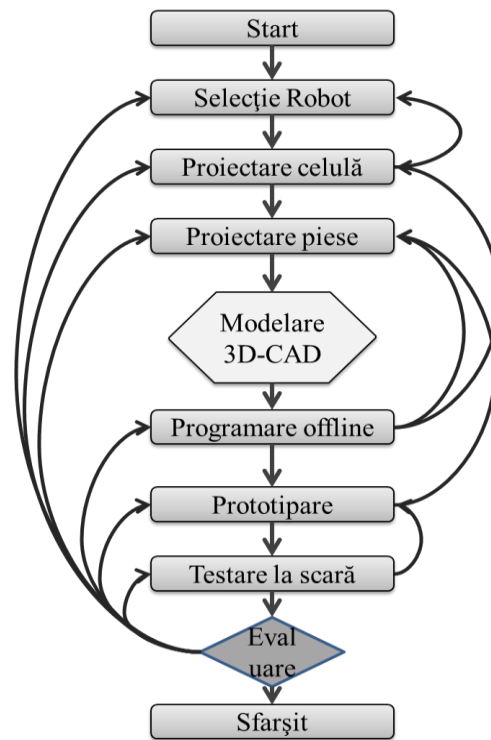


Fig. 3.22 Procesul de generare și testare prin simulare a traiectoriei

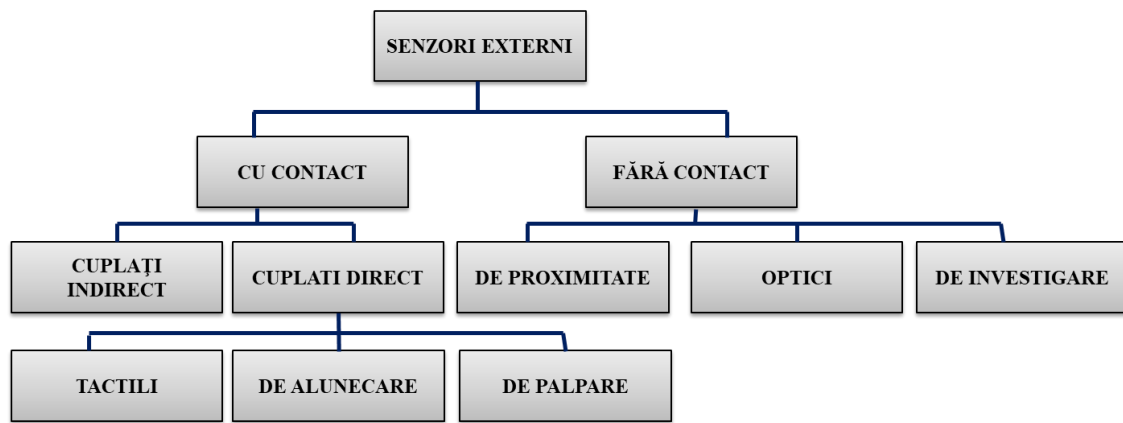


Fig. 3.23 Clasificarea senzorilor externi

senzorilor disponibili în acest moment, ținând cont de proprietățile lor fizice și de capacitatea de operare, se pot clasifica în senzori cu contact sau fără contact.

Senzorii fără contact servesc, cu precădere, la identificarea obiectelor, a poziției și orientării acestora și, uneori, la controlul calității.

Senzorii cu contact frecvent, în funcție de mărimea fizică măsurată în zone de contact direct pot fi de forță, de cuplu, de presiune etc. În ultimul timp, există o cerere mare pentru roboți, cu capacități de control a interacțiunilor, pentru procese de asamblare, debavurare, șlefuire etc. [Winkler, 2013; Falco, 2016; Sbanca, 2015b]. Senzorii de interacțiune externi actuali sunt inteligenți, oferind și capabilități suplimentare de analiză și interpretare a datelor.

3.6.3 CELULE ROBOTICE CA AGENȚI DE COOPERARE ȘI COMUNICAȚIE

Celulele robotice, ca agenți de cooperare și comunicație, au arhitecturi deschise, se pot implementa pe o varietate de platforme create de diverși furnizori, pot coopera cu alte sisteme de aplicații și asigură interfețe flexibile și avansate cu utilizatorii [Oliviera, 2010; Artega, 2005].

Din cauza faptului că modulele de intrare/ieșire și modulele de comunicații pentru roboți, au prețuri mult mai mari comparativ cu modulele similare pentru calculator, acestea din urmă sunt adoptate în marea majoritate a cazurilor practice.

O altă abordare presupune menținerea logicii de bază a robotului privitor la modul de control al axelor, dar preluarea din alte surse a modului de generare a traiectoriei și/sau de corecție a acesteia.

La nivel superior, roboții industriali pot fi integrați în rețele cu alți roboți, diverse stații de lucru și calculatoare, alcătuind *linii flexibile de fabricație* (fig. 3.25) organizate la nivel superior în *celule flexibile de fabricație*. Cea mai importantă caracteristică a unei celule de fabricație flexibilă este că se adaptează ușor la noi cerințe de fabricație care pot merge de la un produs modificat până la realizarea unui produs complet nou.

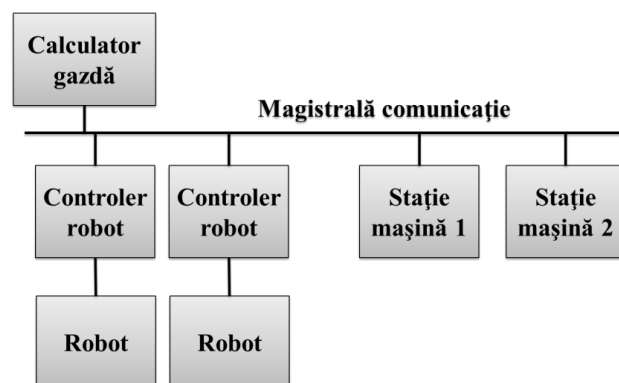


Fig. 3.25 Structura generală a unei linii flexibile în rețea

3.7 ROBOTIZAREA OPERAȚIILOR TEHNOLOGICE INDUSTRIALE

3.7.1 ROBOTIZAREA OPERAȚIILOR DE ASAMBLARE

Operația de asamblare, bolt-alezaj (*peg in hole*), este cea mai reprezentativă pentru robotizare, fiind folosită și pentru studiul proceselor de asamblare, presupunând introducerea unui bolt într-o piesă cu un alezaj (fig 3.28). Preliminar, trebuie definite formele boltului și alezajului, în special, în zona șanfrenelor, precum și orientarea boltului în raport cu alezajul pentru a stabili strategia de asamblare [Callegari,2003; Debus, 2004; Chhatpar, 2001].

Strategiile de asamblare robotizată de tip bolt-alezaj presupun dezvoltarea de algoritmi de deplasare pe o traiectorie și de căutare a poziției de inserare a boltului în alezaj. Astfel, în urma deplasării boltului pe traiectorie,

acesta ajunge într-o poziție cvasicoaxială cu alezajul și apoi, conform algoritmului de căutare prin deplasări pe traiectorii locale și cu corecții generate de semnalele de la senzorul de interacțiune se produce inserarea acestuia în alezaj [Chhatpar,2001; Wang,2008].

Pentru realizarea proceselor de asamblare, de-a lungul timpului, s-au folosit diferite tipuri de structuri de roboți, începând cu brațe de manipulare cu trei grade de libertate și terminând cu structuri redundante cu mai mult de șase grade de libertate, care au fost integrate în diverse celule de asamblare [Bruyninckx, 1995; Bruzzone, 2002; Asad, 2010].

Obiectivul principal urmărit în studiile de analiză a posibilităților de asamblare robotizată este de a folosi cât mai puține dispozitive periferice, dar să se obțină poziționări și orientări cu o acuratețe mărită și timpi de asamblare reduși.

Sistemele multi robot pot fi utilizate și pentru sarcini de asamblare pentru manipularea obiectelor de dimensiuni și/sau mase mari unde, un singur robot nu ar face față [Balasubramanian, 2011; Akella, 1999].

3.7.2 ROBOTIZAREA OPERAȚIILOR DE ÎNFĂȘURARE A FIBRELOR PENTRU OBTINEREA DE STRUCTURI COMPOZITE

Evoluția tehnologiilor în ce privește roboții industriali a făcut posibilă deschiderea căilor către diferite abordări, precum cea referitoare la *procesul de înfășurare*. Prin metode clasice manuale sau semiautomate, fibrele sunt înfășurate prin tragere, printr-o mișcare a capului de ghidare a fibrei pe traiectorie, matrița fiind fixă, sau prin mișcări de translație a capului de ghidare și de rotație a matriței în jurul axei proprii. Necesitatea produselor compozite obținute prin înfășurarea firelor într-o gamă largă de aplicații a condus la crearea a numeroase tehnologii de obținere și de noi tehnici de înfășurare.

Sistemele de înfășurare robotizate a fibrelor se evidențiază, în literatura de specialitate, în două variante. În cazul primei variante, pentru înfășurare se plasează rola cu fibra de carbon direct pe robot pentru a asigura libertate de mișcare mărită chiar și pentru traiectorii complexe. Aceasta variantă este aplicabilă numai în cazul utilizării fibrei preimpregnate. Cea de-a doua variantă presupune existența în zona adiacentă robotului a unui sistem de impregnare și tensionare, utilizând dispozitive dedicate [Ren, 2007]. Scopul acestui sistem este de a realiza impregnarea și tensionarea între rola de alimentare cu fibră și capul de înfășurare [Abdallah, 2010; Akkus, 2008; Brayton, 2009; Parsons, 2002].

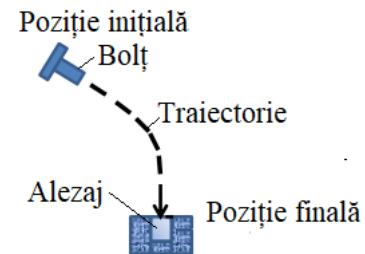


Fig. 3.28 Procesul de asamblare bolt-alezaj

În procesele de înfășurare robotizate precum cele prezentate în lucrările [Bubeck, 1988; Minsch, 2017] trebuie considerată și poziția rolei de alimentare cu fibră de carbon. În lucrarea [Polini, 2005], rola de alimentare fibră este plasată direct pe brațul robotului, în apropierea capului de înfășurare. În acest caz pentru a putea realimenta (schimba rola) sistemul cu fibră de carbon este necesar să se oprească robotul.

Considerând dezavantajele metodelor clasice de înfășurare și evidențiindu-se așteptările unei creșteri mari a cererii pentru produse din materiale compozite, robotizarea proceselor tehnologice este o cale sigură de obținere de produse performante la costuri reduse.

Necesitatea utilizării celulelor cu doi roboți vine din complexitatea și singularitatea matrițelor de înfășurat. Pentru acoperirea diverselor forme de structuri compozite se pot concepe matrițe de înfășurat fixe și mobile uniaxial, multiaxial sau cu mișcări oarecare. Pentru cazurile sistemelor cu matrițe fixe sau mobile uniaxial în vederea realizării înfășurării este suficient folosirea unui robot, deseori, completat cu dispozitive auxiliare [Minsch, 2017; Pires, 2005; Heitz, 2013]. În cazul matrițelor mobile multiaxial sau cu mișcări oarecare, se recomandă utilizarea a doi roboți, unul pentru manipularea capului de înfășurare și celălalt, a matriței, pentru traiectorii distincte.

3.8 CONCLUZII

În acest capitol sunt prezentate sintetic, pe de o parte, aspecte privind particularitățile mediilor industriale legate de posibilitățile de integrare a roboților industriali și, pe de altă parte, nivelul actual al implementării acestora în aplicații, în special de asamblare și înfășurare a fibrelor.

Din analiza activităților executabile de roboți în mediile industriale, dar și din tendințele actuale din robotica industrială, rezultă necesitatea dezvoltării de cercetări privind dezvoltarea unei platforme care să integreze o gamă cât mai largă de funcționalități. Fiecare producător implementează în roboții proprii anumite funcționalități și modalități de control și programare. Acest lucru face imposibilă acoperirea tuturor necesităților de robotizare actuale și dezvoltarea, în continuare, a acestui domeniu se face în direcțiile mării flexibilității și lărgirii posibilităților de personalizare pentru aplicații specifice.

Din aceste considerente și prin studiile din această lucrare se urmărește conceperea și dezvoltarea unui sistem robotizat, personalizat pentru procese de înfășurare a fibrelor, cu roboți industriali universali. Acest sistem conține o gamă largă de dispozitive periferice, senzori și/sau echipamente de control, interfațate pentru a lucra integrat.

Sistemul de conducere al unui robot este strâns corelat cu modalitatea de programare a acestuia, ca proces de introducere a cerințelor utilizatorului, cu ajutorul unor limbaje de programare de tip imperativ sau declarativ și de folosire a unor interfețe om-robot. Din punct de vedere al programării roboților industriali fișii, în ultima perioadă de timp s-au dezvoltat modele dedicate, bazate pe programarea prin instruire sau cea textuală. În același timp, în majoritatea studiilor s-a luat în considerare controlul unui singur robot, cu toate că nevoile actuale ale industriei relevă faptul că este o nevoie clară de sisteme de roboți care să lucreze în colaborare. Celulele multirobot actuale au la bază sisteme de conducere care coordonează sistemele de control și comandă ale roboților pentru îndeplinirea sarcinilor impuse, dar și pentru evitarea situațiilor de risc, precum coliziuni între roboți sau cu obiectele din spațiul de lucru. Totuși, nu există multe metode de control și sisteme dezvoltate care să implice controlul a mai mulți roboți aflați în deplină colaborare.

În concluzie, în urma analizei stadiului actual al cercetărilor de adaptare și implementare a roboților industriali fișii, în activități din medii industriale, se evidențiază tendința de dezvoltare a acestora ca sisteme inteligente, cu capacități evaluate de învățare și de interacțiune cu operatorul.

4. MODELAREA PROCESELOR DE ÎNFĂȘURARE ROBOTIZATĂ A FIBRELOR

4.1. DESCRIEREA STRUCTURII COMPOZITE

Având în vedere diversitatea structurilor compozite dezvoltate în practică, pentru studiile din cadrul acestei teze de doctorat, s-a considerat ca fiind reprezentativă piesa suport coloană de direcție, inițial executată din oțel (fig. 4.1,a) care, ca urmare a studiilor realizate în cadrul tezei de doctorat, *Performanțele fizico-mecanice ale pieselor din materiale compozite utilizate pentru coloana de direcție a autovehiculului*, elaborată de dr. Ing. Thomas Heitz, [Heitz, 2013], a fost concepută și dezvoltată o piesă, structură compozită pe bază de fibră de carbon (fig. 4.1,b).

Această structură a fost realizată prin procesul de înfășurare robotizată a fibrei, bazat pe studiile dezvoltate în cadrul acestei teze de doctorat. Piesa propusă spre realizare se efectuează, în acest moment, prin turnare sau sudare.

Pentru înlocuirea piesei din oțel cu o structură compozită din fibră de carbon, obținută prin procedeul de înfășurare, s-a conceput și realizat o matriță care conține locașuri în care urmează să se înfășoare fibra de carbon (fig. 4.2).

Procedeul de înfășurare cu fir (fibră de carbon) este un proces de producție prin intermediul căruia se obțin structuri prin înfășurarea continuă a fibrei pe o anumită formă sau matriță. Există în prezent diverse instalații și sisteme utilizate pentru realizarea procesului de înfășurare pentru modele simple (de obicei, cu forme cilindrice).

Pentru evitarea dezavantajelor sistemelor actuale de producție a structurilor din materiale compozite, în ultima perioadă de timp, s-au realizat teste de înfășurare robotizată a fibrelor de carbon, mai ales, în condiții de laborator. Pentru modelarea procesului de înfășurare a fibrei cu un robot industrial s-a considerat cazul structurii din fig. 4.1,b, care se obține prin înfășurare în matrița din fig. 4.2.

Traseul de așezare a fibrei în matriță prin deplasarea capului de înfășurare pe o traiectorie, prezintă atât segmente de dreaptă pe zonele de legătură între ranforsările piesei de



a



b

Fig. 4.1 Suport coloană de direcție: **a** - din oțel, **b** - din fibră de carbon



Fig. 4.2 Matrița suport pentru înfășurarea fibrei de carbon

carbon, cât și arce de cerc cu raze și unghiuri diverse.

În fig. 4.3 se prezintă *traseul fibrei de carbon în matriță* și *traectoria punctului caracteristic* al robotului, asociat capului de înfășurare împreună cu sistemul propriu de coordonate. Traectoria robotului utilizat pentru înfășurare se determină offline prin unirea punctelor de traectorie prin segmente de dreaptă sau arce de cerc între trei puncte. Se poate observa că cele două linii nu se suprapun deoarece traseul fibrei de carbon trebuie să corespundă cu locașurile destinate acesteia în matriță, iar traectoria capului de înfășurare este determinată astfel încât să asigure condițiile corespunzătoare de înfășurare (de orientare și tensionare a fibrei) și să elimine orice risc de coliziune cu matrița. Cel de al doilea robot are rolul principal de manipulare a matriței prin rotirea acesteia într-un mod sincronizat cu robotul de înfășurare prin intermediul algoritmilor implementați în cadrul platformei master.

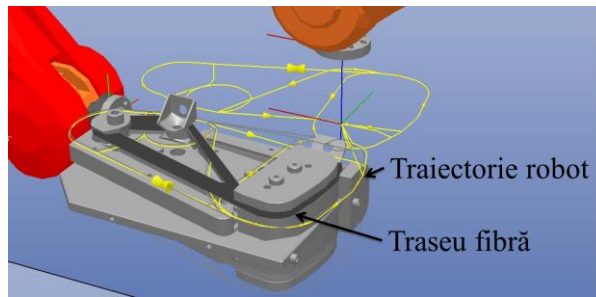


Fig. 4.3 Traectoria robotului și traseul fibrei de carbon pe o față a matriței

Pentru studiile din acest capitol, considerând că robotul se deplasează pe o traectorie cu viteză constantă, se urmărește determinarea pozițiilor și orientărilor capului de înfășurare, precum și a eforturilor (forțelor interne) din fibră, necesare pentru a se obține un proces de înfășurare și o structură din fibră, conform cerințelor impuse.

4.2. PLANIFICAREA, GENERAREA ȘI IMPLEMENTAREA TRAIECTORIILOR ÎN PROCESUL DE ÎNFĂȘURARE

4.2.1 PLANIFICAREA TRAIECTORIILOR DE ÎNFĂȘURARE

În general, roboții industriali universali, pentru urmărirea traectoriilor impuse programate, au două modele de deplasare, discret și continuu. În cazul alegerii modelului de urmărire discret, toate axele robotului au suficient timp pentru a executa comanda curentă înainte de a se lansa următoarea comandă de deplasare. La deplasarea conform modului de urmărire continuu nu mai sunt respectate constrângerile din cazul deplasării discrete, și este posibil, ca prehensorul robotului să nu se mai deplaseze până în punctul final, ci doar prin apropierea lui.

Pentru început se planifică subtraectoriile circulare din jurul elementelor de ranforsare. Pentru aceasta se ține cont de raza capului de înfășurare în zona de ieșire a fibrei, astfel încât distanțele dintre traectoria punctului caracteristic (situat în zona de ieșire a fibrei) și elementele de ranforsare să nu fie mai mici decât raza primului, pentru a evita coliziunile. În continuare, se determină orientările fibrei în zonele de intrare și părăsire a subtraectoriilor circulare, în sensul că unghiurile sectoarelor circulare să nu fie mai mici de 90° (fig. 4.5). În final, după ce se va alege strategia de înfășurare a fibrei în straturi, se vor descrie subtraectoriile de trecere de la un strat la altul.

În fig. 4.5 se observă că în matriță există *trasee de așezare* în jurul elementelor de ranforsare (marcate cu galben), care includ și linii curbe (arce de cerc), și *trasee de legătură* între acestea, care sunt linii drepte. Traectoria impusă robotului pentru înfășurare este diferită de traseele de așezare și de legătură. Această diferență este impusă de condițiile de așezare corectă a fibrei, dependente de nivelul de tensionare al acesteia, în momentul părăsirii capului de înfășurare, dar și de modul de organizare al fibrei, strat peste strat, în pachete cu distribuție impusă.

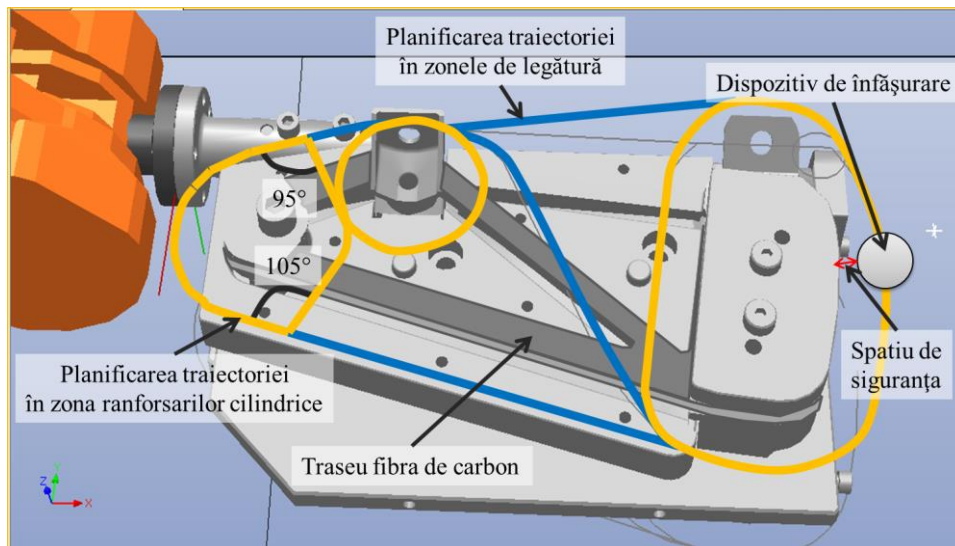


Fig 4.5 Planificarea traiectoriei robotului pentru procesul de înfășurare

4.2.2 GENERAREA TRAIECTORIILOR DE ÎNFĂȘURARE

4.2.2.1 ALGORITMUL PROCESULUI DE GENERARE A TRAIECTORIEI DE ÎNFĂȘURARE

Pentru generarea traiectoriei prin înfășurarea fibrei în locașurile matriței se parcurg două etape (fig 4.6). Prima etapă se derulează offline și presupune generarea și simularea urmării traiectoriei în mediul virtual, iar etapa a doua, implică, transpunerea, ajustarea și testarea traiectoriei planificată în mediul virtual, în mediul real.

Conform schemei din fig. 4.6, prima etapă în realizarea procesului de înfășurare a fibrei este modelarea virtuală a sistemului. În cadrul mediului Robot Studio au fost introduse toate elementele fizice utilizate pentru înfășurare, cei doi roboți industriali ABB, matrița de înfășurat, capul de înfășurare împreună cu dispozitivul de pretensionare. Pe baza acestora, precum și a restricțiilor impuse, s-a generat traiectoria virtuală de deplasare a roboților, traiectorie care ulterior este testată în simulatorul virtual. În pasul următor se vor face simulări de înfășurare în mediul real deoarece prin simularea traiectoriei în mediul virtual nu se poate

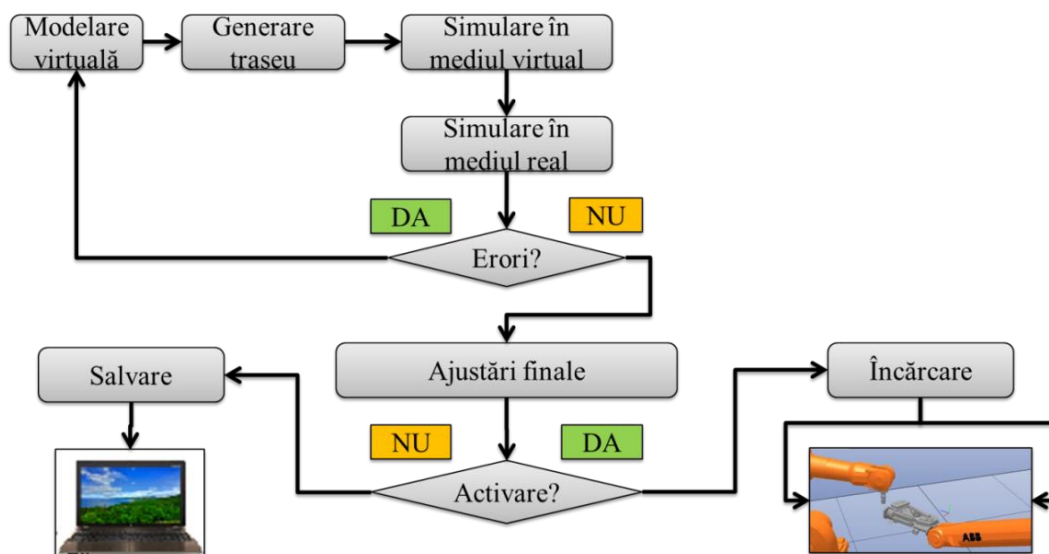


Fig. 4.6 Schema algoritmului de generare a traiectoriei de înfășurare

verifica cu precizie traseul real de așezare al fibrei în matriță. În cazul în care se observă deficiențe majore, se revine la prima etapa, iar, în cazurile în care acestea sunt minore se realizează ajustări finale, care pot ține cont de numărul de parcurgeri repetate a traiectoriei sau de numărul acțiunilor de verificare suplimentare. În final, după luarea deciziei că traiectoria simulată corespunde, se vor stoca datele (de obicei, coordonatele unor puncte de pe traiectorie) pentru utilizare ulterioară.

4.2.2.2 GENERAREA TRAIECTORIILOR ÎN MEDII VIRTUALE

Robotul este tratat ca fiind un sistem autocondonat, pe care este amplasat capul de înfășurare prin intermediul căruia va fi dispusă fibra de carbon în matriță. Traiectoria capului de înfășurare se consideră ca mulțime a pozițiilor punctului de ieșire a fibrei de carbon.

Traiectoria robotului, la înfășurarea fibrei pentru depunerea pe trasee arc de cerc este formată dintr-o succesiune de puncte ($B_1, B_2, \dots, B_{i-1}, B_i, B_{i+1}, \dots, B_{n-1}, B_n$), care se stabilesc la intersecția tangențelor în puncte ale traseului de depunere ($A_1, A_2, \dots, A_{i-1}, A_i, A_{i+1}, \dots, A_{n-1}, A_n$) cu un cerc echidistant pe rază la distanța (de siguranță), constantă, de la elementul ranforsare (fig. 4.7).

Unghiul θ_t , format de doi vectori de deplasare consecutivi (de ex. $B_{i-1}B_i$ și B_iB_{i+1}), considerând pasul unghiular de discretizare constant (θ/n), numit *unghi de așezare*, se determină cu relația,

$$\theta_t = \pi - \frac{\theta}{n}, \quad (4.1)$$

în care, θ reprezintă unghiul sectorului de cerc al elementului de ranforsare asociat arcului traseului de depunere a fibrei și n – numărul de subsectoare obținute după discretizare.

4.2.4 IMPLEMENTAREA TRAIECTORIILOR ÎN MEDIUL ROBOT/ROBOȚI

Traiectoria virtuală de înfășurare a fibrei cu un robot cu cap de înfășurare este descrisă în fiecare punct de coordonatele punctului, unghiul de înfășurare și distanța de siguranță. Traiectoria generată în mediul de simulare virtual este transferată prin intermediul unei conexiuni directe cu robotul real.

În vederea implementării acestei traiectorii pentru mediul robot real se impune realizarea unor teste preliminare.

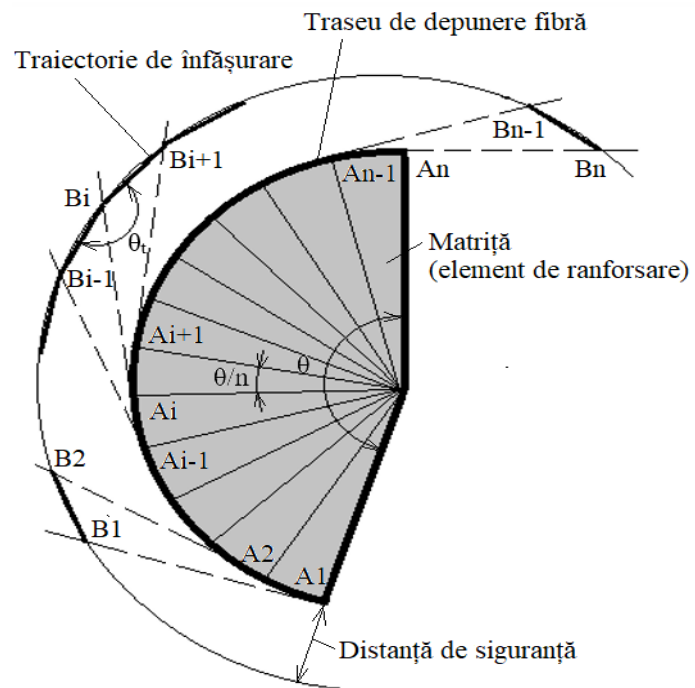


Fig. 4.7 Traiectoria capului de înfășurare pentru depunerea fibrei pe un traseu circular

Pentru a obține volumul de fibră de carbon impus, pentru fiecare regiune din matriță s-a definit numărul de traversări a capului de înfășurare urmărind traseul impus (fig. 4.11).

La implementarea în mediul real se pot realiza ajustări fine de traiectorie atât prin reînvățarea unor poziții intermediare cât și prin deplasarea robotului printr-un algoritm de cooperare om-robot, care implică deplasarea robotului sub acțiunea operatorului (fig. 4.12) consecință a integrării unui senzor de forță/moment care asigură date pentru comenzile de ghidare inversă a robotului [Sbanca 2014].

Ambii roboți implicați în procesul de înfășurare au poziții inițiale stabilite, în funcție de dimensiunile matriței de înfășurat, și de rezultatele calibrării pozițiilor bazelor acestora, în mediul virtual de planificare. Robotul de înfășurare realizează faze succesive de înfășurare, în jurul unor repere virtuale, în mod repetitiv pentru a atinge volumul de fibră impus, până în momentul în care se cere rotirea matriței de către celălalt robot. După transmiterea semnalelor de confirmare între cei doi roboți se execută deplasarea robotului de înfășurare în următoarele faze de înfășurare, în jurul altor repere virtuale de ranforsare. Procesul se repetă, până în momentul atingerii numărului prestabilit de traversări a fiecărui punct de traiectorie, încheindu-se cu revenirea la poziția de start a ambilor roboți.

4.3 MODELAREA ȘI ALGORITMIZAREA PROCESULUI DE TENSIONARE A FIBREI

Pe lângă aspectele de precizie legate de traiectoria de înfășurare, calitatea structurii obținute este influențată și de tensionarea fibrei la înfășurare care trebuie să asigure în urma depunerii o *tensiune (forță internă) în fibră cât mai constantă*, fapt ce determină direct compactarea și alinierea fibrei în piesa finală și deci, și performanțele de rezistență și de rigiditate ale structurii obținute.

În literatura de specialitate există studii în această direcție prin implementarea unui *sistem de tensionare anterior robotului de înfășurat*, [Polini, 2004; Franke 2013], dar în acest caz, acesta este plasat în cadrul sistemului de alimentare, anterior robotului de înfășurare. Distanța până la matriță fiind mare nu se reușește menținerea unei tensionări constante. De asemenea nu se consideră tensionare variabilă în dispozitivul de tensionare pentru a obține în final tensionare constantă în fibra depusă pe matriță. Testele experimentale realizate în cadrul studiilor anterioare au fost realizate pentru obținerea unei structuri compozite sub formă cilindrică sau ovală, menținerea unei tensiuni constante în dispozitivul de tensionare fiind suficient pentru a obține o structura conform specificațiilor mecanice cerute pentru aceasta.

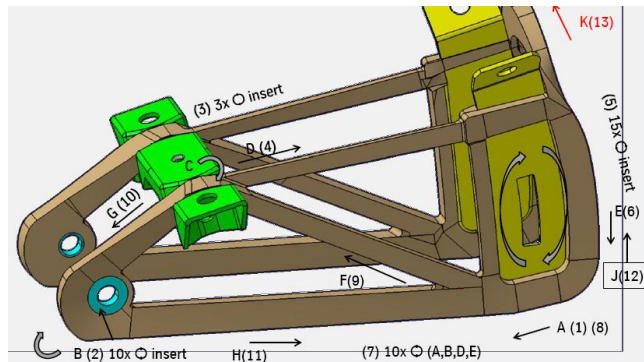


Fig. 4.11 Succesiunea înfășurării (depunerii) fibrei în matriță

Direcția și sensul de deplasare ale robotului

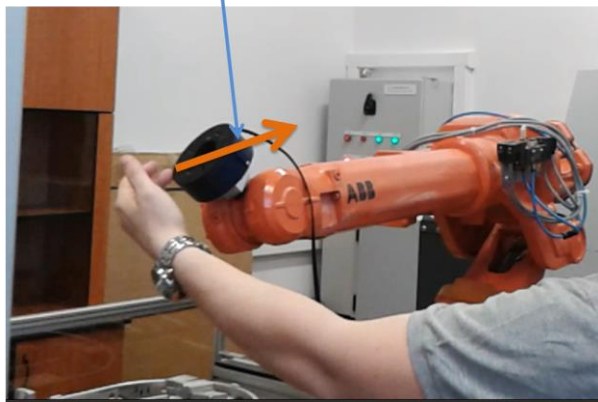


Fig. 4.12 Poziționarea robotului pe baza acțiunii directe a operatorului

Valoarea nominală a tensionii din fibra de carbon depusă, se determină în funcție de caracteristicile mecanice impuse structurii compozite de obținut. Această valoare este calculată la proiectarea structurii compozite (piesa finală), ținând cont de performanțele impuse [Heitz, 2013; Păltinișanu 2012].

La depunerea fibrei în matriță, mai ales pe trasee curbilini, apare efectul de alunecare care se manifestă în egală măsură atât la înfășurarea cu tensionare crescătoare, cât și la cea cu tensionare descrescătoare. Pentru a reduce alunecările și deci, a garanta o tensionare constantă în fibră după depunere, se impune tensionarea controlată a fibrei la înfășurare asigurând astfel forțe interne în fibră variabile.

4.3.1 MODEL STATIC DE ÎNFĂȘURARE A FIBREI CU TENSIONARE

În fig. 4.14 se prezintă modelul static al procesului de înfășurare a fibrei cu tensionare pe un sector de cerc cu raza R și unghiul θ . Pentru elaborarea acestui model s-a considerat, ca ipoteze simplificatoare, faptul că fibra nu opune rezistență la îndoire (este perfect flexibilă) și este inextensibilă, adică nu prezintă modificări de lungime indiferent de mărimea forțelor aplicate.

La înfășurare, asupra fibrei acționează forțe distribuite normal (de reacțiune), dF_n , consecință a presiunilor de contact p_n , și, forțe distribuite tangențial dF_t consecință a tendinței de alunecare cu frecare la înfășurare, când forța de tensionare (tragere) T_θ crește și la revenire când această forță scade (marcată cu linie întreruptă, fig 4.14,b). Forțele tangențiale de frecare se calculează cu relația,

$$dF_t = \mu dF_n, \quad (4.2)$$

unde, μ este coeficientul de frecare dintre fibră și materialul matriței.

Echilibrul forțelor pentru elementul de fibră perfect, în raport cu axele sistemului de coordonate local xy , ținând cont că forțele de frecare se opun tendinței de mișcare relativă, se sintetizează în sistemul,

$$\begin{cases} (T + dT)\cos\frac{d\theta}{2} - T\cos\frac{d\theta}{2} \pm dF_t = 0 \\ (T + dT)\sin\frac{d\theta}{2} - T\sin\frac{d\theta}{2} - dF_n = 0, \end{cases} \quad (4.3)$$

$$dF_t = \mu dF_n$$

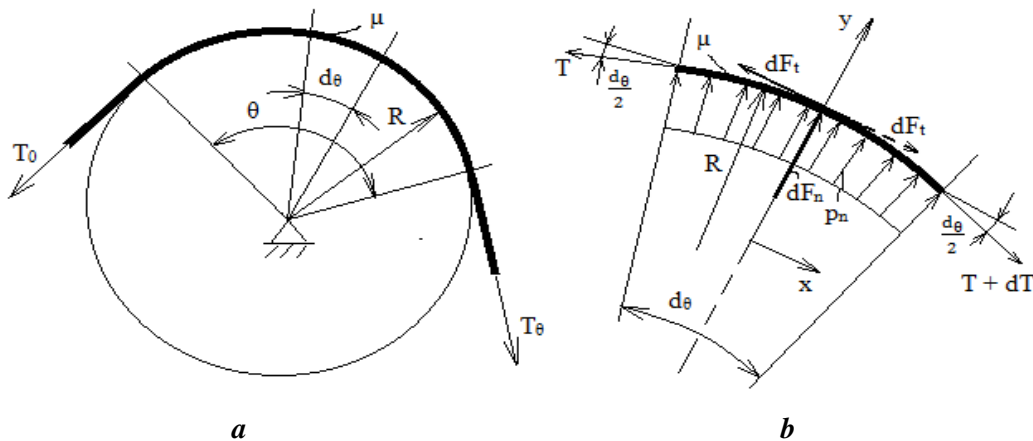


Fig. 4.14 Model static al înfășurării fibrei cu tensionare pe un arc de cerc: **a** - parametri reprezentativi, **b** - detaliu cu echilibrul local a forțelor

în care, T reprezintă efortul (forța internă) din fibră în punctul curent care variază de la T_0 , efortul la începutul înfășurării, la T_θ , efortul la sfârșitul înfășurării fibrei; dT - creșterea efortului din fibră, ca urmare a înfășurării cu unghiul $d\theta$ (fig. 4.14).

Sistemul de ecuații (4.3), ținând cont de aproximările $\cos \frac{d\theta}{2} \cong 1$ și $\sin \frac{d\theta}{2} \cong \frac{d\theta}{2}$, devine,

$$\begin{cases} dT \pm \mu dF_n = 0 \\ 2T \frac{d\theta}{2} - dF_n = 0 \end{cases}, \quad (4.4)$$

Din acest sistem rezultă ecuația diferențială,

$$\frac{dT}{T} = \pm \mu d\theta, \quad (4.5)$$

care prin integrare, ținând cont de limitele efortului din fibră și ale unghiului de înfășurare, ia forma,

$$\int_{T_0}^{T_\theta} \frac{dT}{T} = \pm \mu \int_0^\theta d\theta, \quad (4.6)$$

din care rezultă relațiile:

$$\ln \frac{T_\theta}{T_0} = \pm \mu d\theta, \quad (4.7)$$

$$T_\theta = T_0 e^{\pm \mu \theta}. \quad (4.8)$$

Din relația (4.7) se evidențiază două valori limită, efortul maxim,

$$T_\theta^{\max} = T_0 e^{\mu \theta}, \quad (4.9)$$

la înfășurare și efortul minim,

$$T_\theta^{\min} = T_0 e^{-\mu \theta}, \quad (4.10)$$

după finalizarea înfășurării.

Ținând cont de relațiile (4.9) și (4.10) se determină, condiția de asigurare a tensionării constante (cu efortul T_0) a fibrei după depunere,

$$T_0 e^{-\mu \theta} \leq T_0 \leq T_0 e^{\mu \theta}. \quad (4.11)$$

Pentru calcule, *coeficientul de frecare* dintre suprafețele de depunere în matrița din aluminiu și fibra de carbon impregnată cu rășină (pentru primul rând) sau dintre fibra depusă și fibra înfășurată (pentru rândurile următoare), conform [Buckley, 1973] se consideră, $\mu = 0,5$.

În urma analizelor cu elemente finite și studiilor experimentale realizate în lucrarea [Heitz, 2013], pentru structura din fig. 4.1, obținută prin înfășurarea robotizată, valoarea nominală a efortului din fibră după depunere, $T_0 = 15$ N.

4.3.2 DETERMINAREA EFORTULUI DE TENSIONARE

Spre deosebire de *sistemele clasice de tensionare* care realizează tensionarea constantă a fibrei cu un dispozitiv dedicat înainte de capul de înfășurare rezultând după depunere eforturi în fibră variabile (consecință, a pierderii tensionării, mai ales, după înfășurarea pe trasee curbilinii), *sistemele robotizate* realizează înfășurarea cu tensionare variabilă cu un dispozitiv integrat în capul de înfășurare, rezultând, după depunere, în fibră eforturi cvasiconstante (caz mult mai eficient din punct de vedere al performanțelor structurii obținute).

În fig. 4.17 se prezintă diagrama eforturilor din fibră pentru o porțiune dintr-o subtraietorie laterală (stânga/dreapta), considerată în planul XY. În această zonă, subtraietoria este compusă din cinci arce de cerc (cu raze diferite) racordate cu segmente de dreaptă tangente la acestea, spre deosebire de arcul 4 care nu respectă condiția de tangență, racordarea făcându-se cu arce de cerc cu rază redusă, neconsiderate în acest model. Efortul din fibră în timpul înfășurării în această zonă conform modelului prezentat mai sus are valoarea T_0 la înfășurarea după un traseu în linie dreaptă și are valori crescătoare la înfășurarea după trasee curbilinii (v. rel. 4.8). Valoarea maximă a efortului de tensionare în zona reprezentată în fig. 4.17, este la finele arcului 2 precedat de arcul 1 ($\theta_1 = 0,25$ rad, $\theta_2 = 0,44$ rad), considerând $T_0 = 15$ N și $\mu = 0,5$, conform relației (4.9), $T_{\max} = 90,9$ N. Valoarea minimă a efortului de tensionare a fibrei, în aceleași condiții, conform relației (4.10), $T_{\min} = 2,47$ N $<$ T_0 . Valorile extreme (maximă și minimă) ale eforturilor din fibră reprezintă *forțele maxime/minime de tensionare* ce au fost folosite pentru proiectarea, implementarea și calibrarea dispozitivului de tensionare realizat.

În fig. 4.17 suprapus peste traiectoria teoretică sunt marcate și punctele traiectoriei programate la nivelul controlerului robotului prin valorile coordonatelor în raport cu sistemul de coordonate cartezian, asociat robotului de înfășurare. În plus, au fost marcate și eforturile de tensionare corespunzătoare modelului teoretic (diagrama de eforturi) în punctele traiectoriei programate. Astfel, se observă că în zonele de trecere de la arcele de cerc la segmente de dreaptă, deoarece punctele programate nu sunt identice cu cele de trecere, apar

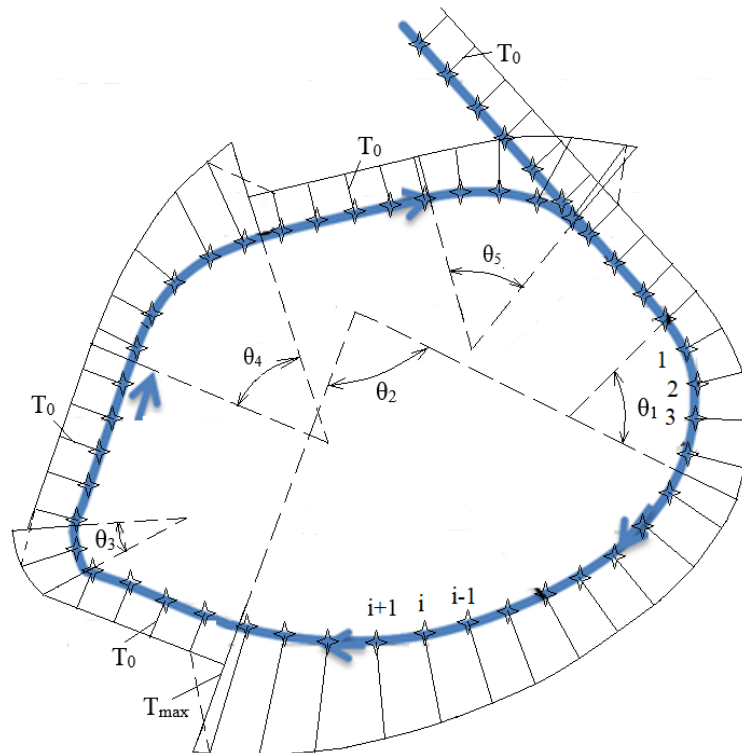


Fig. 4.17 Diagrama efortului de tensionare a fibrei în zona A din fig. 4.16

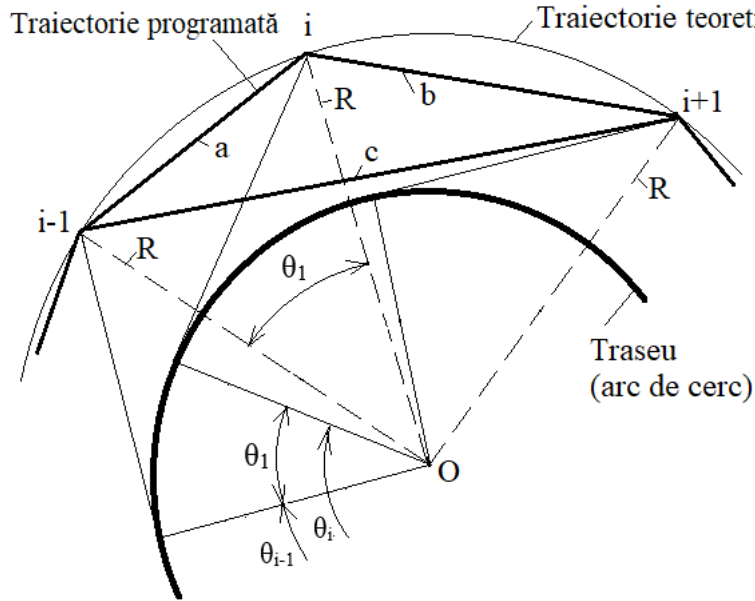


Fig. 4.18 Model pentru determinarea pasului unghiular de înfășurare

erori ale valorilor eforturilor programate (marcate cu linie întreruptă în fig. 4.17).

Pentru identificarea zonelor curbilinii se consideră trei puncte consecutive de pe traseul de înfășurare programat, $i-1$, i , $i+1$ (fig. 4.17) cu coordonatele (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) și, respectiv (x_{i+1}, y_{i+1}) , și se va verifica dacă sunt coliniare cu relația,

$$\begin{vmatrix} x_{i-1} & y_{i-1} & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \end{vmatrix} = 0, \quad (4.12)$$

care, în formă explicită, devine,

$$x_{i-1} y_i + x_i y_{i+1} + x_{i+1} y_{i-1} - x_{i+1} y_i - y_{i+1} x_{i-1} - x_i y_{i-1} = 0. \quad (4.13)$$

Calculând partea din stânga a acestei ecuații se poate decide cu o eroare impusă (E_r) dacă cele trei puncte sunt coliniare. În cazul în care relația (4.13) nu este îndeplinită, ținând cont de eroarea impusă (alg. 4.1), nu sunt coliniare, atunci se determină unghiul de înfășurare θ_i a fibrei corespunzător punctului i , conform modelului din fig. 4.18, pentru a calcula valoarea efortului (forței interne) care trebuie obținut cu rel. (4.8).

Pentru determinarea unghiului de înfășurare θ_i , cunoscând unghiul de înfășurare θ_{i-1} în punctul anterior $i-1$ este necesar să se determine pasul unghiular θ_1 care se determină, pornind de la valorile lungimilor laturilor triunghiului format de cele trei puncte,

$$a = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}, \quad (4.14)$$

$$b = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (4.15)$$

$$c = \sqrt{(x_{i+1} - x_{i-1})^2 + (y_{i+1} - y_{i-1})^2}, \quad (4.16)$$

semiperimetrului,

$$p = (a+b+c)/2, \quad (4.17)$$

ariei,

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}, \quad (4.18)$$

și razei cercului circumscris,

$$R = \frac{a b c}{4 S}, \quad (4.19)$$

cu relația,

$$\theta_1 = \arccos \frac{2 R^2 - a^2}{2 R^2}. \quad (4.20)$$

Astfel, pentru unghiul de înfășurare corespunzător punctului i ,

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \theta_1. \quad (4.21)$$

se obține efortul,

$$T_i = T_0 e^{\mu \theta_i}. \quad (4.22)$$

Când are loc o trecere de la un arc de cerc la altul, conform relației (4.21) transpusă în subprogramul de calcul, efortul se calculează în funcție de valoarea unghiului rezultat pentru arcul de cerc, respectiv segmentul de dreaptă, anterior. În cazul în care ultimele trei puncte sunt coliniare are loc o revenire la o valoare a efortului egală cu efortul nominal, T_0 .

În continuare, cunoscându-se valorile efortului în toate punctele traiectoriei, se poate trece la urmărirea traiectoriei programate cu controlul continuu a procesului de înfășurare cu tensionare variabilă (v. subcap 7.3).

4.4 CONCLUZII

În acest capitol se prezintă modelele teoretice și algoritmi necesari realizării procesului de înfășurare a fibrei de carbon în traseele din matrița suport, pornind de la structura constructivă a dispozitivelor și finalizând cu determinarea valorilor eforturilor de tensionare în punctele traiectoriei de înfășurare planificată.

În prima parte a capitolului se prezintă metodele de planificare și generare a traiectoriilor roboților ABB (IRB 2400 și IRB 1600), considerând tipurile de traiectorii, discrete sau continue, care pot fi urmărite de aceștia. Planificarea traiectoriei se realizează în concordanță cu traseele din matrița suport care includ subtrasee în zone cu ranforsări sau în zone de legătură între acestea, fibra de carbon având un traseu de așezare bine definit care, în final, determină traiectoriile roboților.

În cadrul celei de a doua părți ale acestui capitol se prezintă tehnicile de modelare și de implementare a tensionării fibrei de carbon în timpul procesului de înfășurare. Forța de tensionare care trebuie aplicată în dispozitivul de tensionare în fiecare moment al traiectoriei este un parametru variabil. Pentru ca fibra de carbon care se așează pe matriță pe sub trasee circulare să rămână, după înfășurare, tensionată cu un efort constant impus, este necesar ca în timpul înfășurării, să se impună sistemului de tensionare o forță variabilă, calculată preliminar conform modelului teoretic. Pentru acest calcul se propune un algoritm prin care se calculează forța de tensionare în fiecare punct al traiectoriei.

5. SISTEM ROBOTIZAT DE TENSIONARE ȘI ÎNFĂȘURARE A FIBRELOR

Introducerea *sistemelor robotizate de înfășurare cu tensionarea fibrei* pe parcursul înfășurării, pentru obținerea de structuri compozite, prezintă o serie de avantaje: obținerea unei tensionări (eforturi) constante a fibrei după depunere și deci, performanțe de rezistență și rigiditate ridicate a pieselor rezultate, reducerea costurilor de producție, reducerea consumului de fibră, precum și creșterea productivității.

Înfășurarea robotizată este descrisă în studiile din literatură, mai ales, prin utilizarea unui singur robot, cu rol de înfășurător a fibrei pentru depunere pe traseele impuse într-o matriță suport. În urma identificării unei traiectorii optime atât din punct de vedere al modului de plasare al fibrelor, cât și din punct de vedere a posibilității de tensionare pentru a rezulta tensionări constante după înfășurare, se impune concepția unui cap de înfășurare care conține un dispozitiv de tensionare ce realizează eforturi de tensionare variabile, mai ales, la înfășurarea pe trasee curbilunii implementate în matriță. Pentru a putea controla în mod programabil efortul din fibră la înfășurare este necesar și un subsistem senzorial de măsurare a forțelor/momentelor.

În acest capitol se prezintă concepția, proiectarea, dezvoltarea și implementarea unui sistem de tensionare și înfășurare a fibrei care poate fi integrat în sisteme robotizate cu unul sau cu doi roboți.

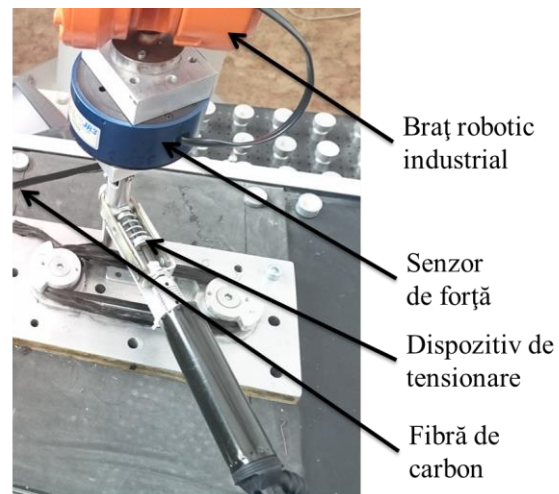
5.1. SUBSISTEMUL DE MĂSURARE A EFORTULUI DE TENSIONARE A FIBREI

În fig. 5.1 se prezintă structura sistemului de tensionare și înfășurare propus care este controlat în buclă închisă. Implementarea în timpul procesului de înfășurare a fibrei, în vederea depunerii acesteia în matriță, presupune măsurarea continuă a efortului (forța internă din fibră) și compararea valorii măsurate cu cea programată, urmând ca sistemul de control să ia decizii de corecție și transmitere de comenzi unui servomotor de acționare într-un timp real.

În majoritatea cazurilor de înfășurare de fibră de carbon cu un cap montat pe brațul robot, pentru a determina valoarea efortului din fibră se utilizează un senzor de forță, plasat între capul de înfășurare și brațul robot.

Senzorul de forță are scopul de a măsura componentele (F_x , F_y , F_z) forței de reacțiune dintre capul de înfășurare și fibră la ieșire (fig. 5.2) și deci, pentru determinarea valorii efortului care apare în fibră la înfășurare,

$$T = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} . \quad (5.1)$$



Valorile efortului din fibră în procesul de înfășurare includ și forțele de frecare care apar în capul de înfășurare și cele impuse de subsistemul de alimentare, T_e . Considerând faptul că, în acest caz, efortul din fir este un vector cu direcția oarecare, s-a propus utilizarea unui senzor de forță performant care are posibilitatea de a returna valorile vectorilor de forță pe toate cele trei direcții ale axelor carteziene ale unui sistem de coordonate triortogonal drept. Acest senzor poate fi utilizat și pentru a identifica totodată direcția de deplasare a fibrei, pentru a putea controla, în caz că este nevoie, orientarea fibrei pe traiectoria robotului [Sbanca, 2014].

În cadrul acestui studiu s-a utilizat *senzorul de forță JR3* (fig. 5.3) care măsoară forțe și momente după axele unui sistem de coordonate triortogonal drept. Sistemul electronic și receptorul de date se conectează prin cablu la traductor. Datele generate de senzorul de forță sunt transmise sincron la un receptor serial. Cu modelul selectat se pot măsura valori ale forțelor de până la 200 N, pe axele x și y , de 400 N pe axa z , și valori ale momentelor de până la 16 Nm. Rezoluția de măsurare este de 0,025 N, ceea ce reprezintă o acuratețe ridicată. Punctul de referință a forțelor/momentelor este poziționat în centrul geometric al senzorului.

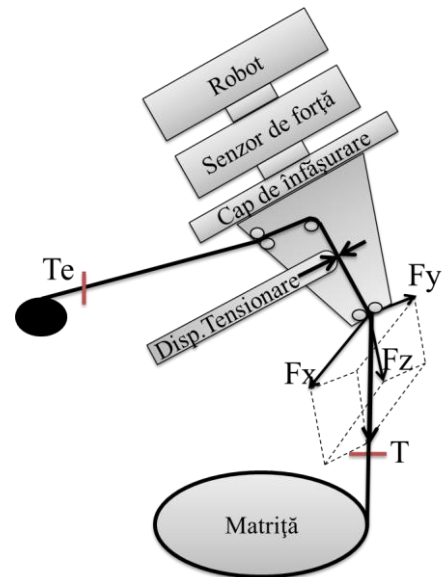


Fig. 5.2 Forțele de ghidare a fibrei la înfășurarea cu tensionare

5.2. DISPOZITIVUL DE TENSIONARE CONTROLATĂ A FIBREI

Înfășurarea robotizată a fibrei, de obicei, include și procesul de tensionare care se poate realiza cu sisteme pur software, când tensionarea se face prin controlul forțelor din cuplele robotului, sau cu dispozitive dedicate integrate în capul de înfășurare prin care trece fibra de carbon asupra căreia se aplică forțe locale controlate. În cadrul studiilor din această lucrare, având în vedere că roboții din dotare nu au posibilități de control în forță, s-a optat pentru varianta a doua.

5.2.1. STRUCTURA FUNCȚIONAL-CONSTRUCTIVĂ

Pentru a obține rezultate cât mai apropiate de realitate, primul pas în dezvoltarea unui dispozitiv de tensionare a fost legat de alegerea și poziționarea senzorului de forță. Astfel, pentru a măsura valoarea efortului din fibră, se impune ca senzorul să fie montat cât mai aproape de dispozitivul de înfășurare și de matrită.

Pentru realizarea cercetărilor din cadrul acestei teze de doctorat s-a conceput, proiectat, dezvoltat și implementat un *subsistem de tensionare controlat*, ca parte integrantă a dispozitivului de înfășurare (fig. 5.1). În acest model, fibra de carbon este trasă de pe rola de alimentare și trecută printr-o baie de rășină. În continuare, fibra trece prin capul de înfășurare care are rolul de ghidare pentru înfășurare în matrită, dar și de tensionare, ca urmare a presării acesteia între două bacuri apăsate controlat de un element elastic. Astfel, tensionarea controlată a fibrei se realizează chiar înainte de înfășurare în matrită și, deoarece distanța până la matrită este cea mai mică posibil, pierderile de tensionare sunt minime.

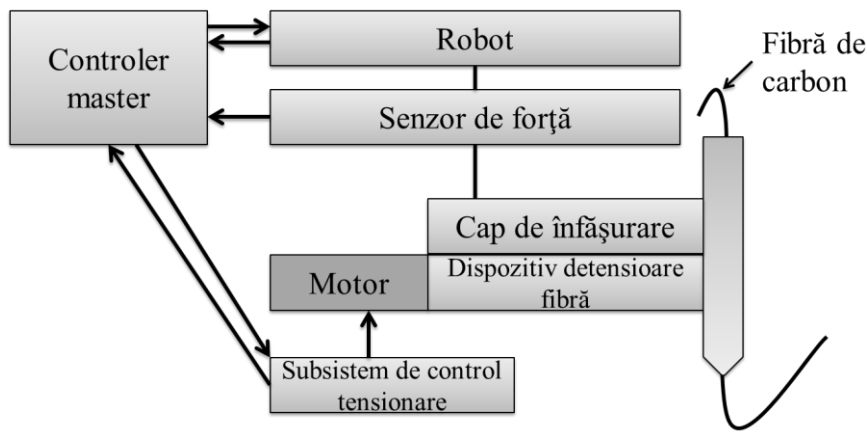


Fig. 5.6 Schema bloc a subsistemului de tensionare integrat

În fig. 5.6 se prezintă schema bloc a dispozitivului de tensionare integrat în sistemul de înfășurare cu robot. Dispozitivul de tensionare este acționat de un motor electric comandat de subsistemul de control tensionare legat la controlerul master, controler master ce conduce procesele de înfășurare și tensionare. Acest sistem elimină dezavantajul principal al celorlalte sisteme existente, de obicei, cu tensionare constantă, prin faptul că realizează tensionare variabilă, astfel că după depunere în matriță, fibra să rămână cu tensionare constantă.

Dispozitivul de tensionare controlată a fibrei, conceput și dezvoltat ca parte componentă a unui cap de înfășurare care se montează pe flanșa finală a unui robot, are structură modulară putând fi integrat și în alte subsansamble de înfășurare, atât la nivel hard, cât și soft. Acesta se caracterizează și prin faptul că dispozitivul controlează automat tensionarea fibrei cu ajutorul unui senzor de forță general care transmite informația către un controler dedicat legat cu subsistemul de control a tensionării ce transmite comenzi motorului electric.

5.2.2. SUBSISTEMUL DE CONTROL TENSIONARE

Sistemul de control master a dispozitivelor componente aferente sistemului de înfășurare cu tensionare a fibrei este legat la controlerul robotului și la subsistemul de control tensionare.

Sistemul de control a tensionării a fost implementat cu ajutorul unui controler Arduino (fig 5.9), în care au fost programați algoritmi de reglare a poziției servomotorului, și de comandă a controlerului L298N pentru conducerea servomotorului de curent continuu în PWM (Puls Width Modulation). Controlerul Arduino, cu rolul de reglare a poziției arborelui servomotorului, este în strânsă legătură cu sistemul de control master de la care primește informații privind eroarea de poziționare.

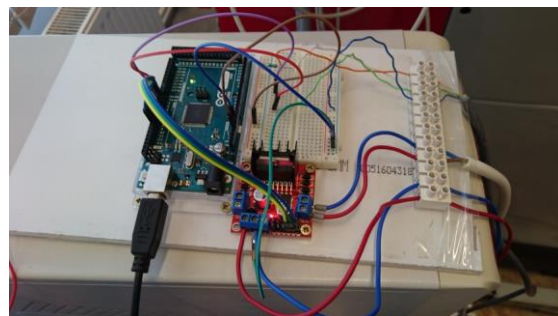


Fig. 5.9 Structura hardware a subsistemului de control servomotor

5.2.3. REGLAREA SUBSISTEMULUI DE TENSIONARE

Am considerat că reglarea tensionării fibrei se bazează pe diferență dintre forță din fibră în timpul procesului și tensionarea dorită pe acea zonă a traiectoriei iar obiectivul este

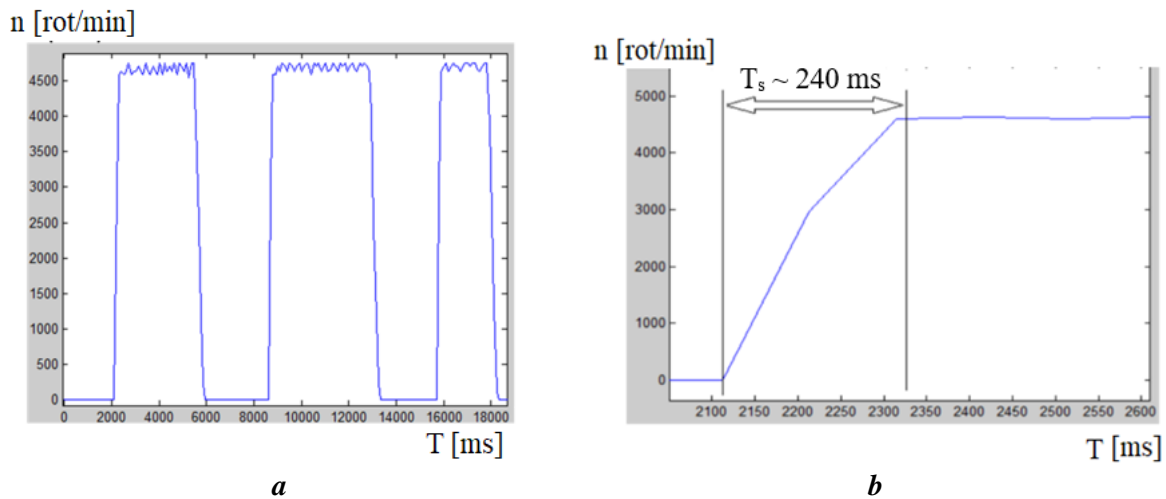


Fig. 5.10 Identificarea parametrilor de lucru **a** – turația servomotorului, **b** – timpul de reglare

poziționarea (apăsarea) cu mare precizie a bacului 5 (v. fig. 5.7,b) pentru generarea unei forțe de frecare de-a lungul fibrei de carbon și, în consecință, a efortului de tensionare din fibră.

5.2.3.1. MODELUL MATEMATIC

Pentru controlul poziției motorului de curent continuu care realizează indirect tensionarea fibrei de carbon, se propune implementarea unui regulator pentru controlul poziției unghiulare a servomotorului, în funcție de tensiunea de alimentare a acestuia.

Funcția de transfer exprimă relația dintre tensiunea aplicată motorului, $U(s)$ și viteza unghiulară a arborelui motorului $\omega(s)$, neglijând regimul tranzitoriu electric și considerând dinamica motorului ca fiind un element de întârziere de ordinul întâi, și se definește cu relația,

$$G_m(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{sT_m + 1}, \quad (5.2)$$

în care, K_m reprezintă factorul de amplificare, rezultat ca raport între valoarea staționară de la ieșirea din sistem și mărimea de intrare în proces și T_m - constanta de timp de întârziere. Mărimea de intrare a procesului reprezentat prin elementul de întârziere de ordinul întâi este tensiunea de alimentare a motorului, iar mărimea de ieșire este viteza unghiulară.

Conform documentației servomotorului electric de curent continuu utilizat, factorul de amplificare, $K_m = 670$. Valoarea acestui factor s-a dedus și experimental prin măsurarea valorilor permise de la servomotor, alimentat la 7 V, și cu turația măsurată la 4700 rot/min (fig. 5.10, a). Rezultatul obținut indică aceeași valoare ($K_m = 670$) cu cea menționată în catalog.

În urma testelor s-a identificat și timpul de stabilizare, $T_s \sim 240$ ms (fig. 5.10,b), procesul fiind rapid, la viteza nominală acesta este foarte mic. Cunoscând faptul că regimul tranzitoriu se încheie după trei constante de timp pentru elementele de ordinul I, se consideră constanta de timp $T_m = T_s/3 \sim 80$ ms.

Deoarece mărimea de ieșire din proces este poziția unghiulară a arborelui servomotorului, $\theta(t)$, se impune conversia funcției de transfer (5.2) cu viteză unghiulară, ca parametru de ieșire în funcția de transfer,

$$G_m(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(sT_m + 1)}, \quad (5.3)$$

cu poziția unghiulară ca parametru de ieșire, prin adăugarea unui element integrator, $1/s$, ca urmare a dependenței,

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}. \quad (5.4)$$

5.2.3.2. REGLAREA POZIȚIONĂRII MOTORULUI DE TENSIONARE

Pentru proiectarea regulatorului se impun două *criterii de performanță*: timpul de stabilizare să fie mai mic de 500 ms și suprareglajul să nu depășească 5%, pentru a nu apărea oscilații la nivelul motorului. Ca urmare a analizei procesului de reglare pentru diverse situații funcționale, s-au conceput și dezvoltat două variante de sisteme de reglare, unul bazat pe un element proporțional (P) și celălalt care adaugă, în plus, un element derivativ și o întârziere de ordinul întâi (PDT1).

În cazul primei variante, cu un regulator de tip proporțional (P), neglijând întârzierea de reglare, $T_m = T_0 = 0$, funcția de transfer (5.3) devine,

$$G_m(s) = \frac{K_m}{s}. \quad (5.5)$$

Considerând funcția de reglare $G_d(s)$, în mod clasic, egală cu constanta de proporționalitate K_R , rezultă funcția sistemului cu reglare în buclă deschisă,

$$G_d(s) = G_m(s) K_R = \frac{K_R K_m}{s}, \quad (5.6)$$

și funcția de transfer a sistemului în buclă închisă, cu element de ordinul întâi,

$$G_0(s) = \frac{G_d(s)}{1+G_d(s)} = \frac{K_R K_m}{s + K_R K_m} = \frac{1}{\frac{s}{K_R K_m} + 1} = \frac{1}{sT_m + 1}, \quad (5.7)$$

din care se obține constanta de timp de reglare a motorului,

$$T_m = \frac{1}{K_R K_m}. \quad (5.8)$$

Din relațiile (5.6) și (5.7), considerând, $T_s = 3T_m$, rezultă,

$$K_R = \frac{1}{T_m K_m} = \frac{3}{T_s K_m}. \quad (5.9)$$

Pe de altă parte, considerând constanta de timp, T_m , nenulă, în realitate aceasta neputând fi neglijată, funcția de reglare în buclă deschisă devine,

$$G_d(s) = \frac{K_R K_m}{s(sT_m + 1)}, \quad (5.10)$$

și funcția de transfer a sistemului în buclă închisă, cu element de ordinul doi, ia formele:

$$G_0(s) = \frac{K_R K_m}{s(sT_m + 1) + K_R K_m} = \frac{K_R K_m}{s^2 + \frac{1}{T_m}s + \frac{K_R K_m}{T_m}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.11)$$

Astfel, cunoscând funcția de transfer se pot analiza cele trei regimuri de funcționare, subamortizat, critic amortizat și supraamortizat în funcție de valoarea factorului de amortizare, ζ , care oferă informații despre natura răspunsului tranzitoriu.

A doua variantă a modelului de reglare, pe baza funcției de transfer (FT) identificate, presupune introducerea unei componente derivate (PDT1). În fig. 5.11 se prezintă schema regulatorului cu componentă derivativă. Funcția de transfer (5.10) sub această formă dispune de un integrator pe calea directă (fără regulator), care asigură eroare staționară nulă în buclă închisă. Prin urmare, trebuie să se aleagă un regulator fără acțiune integrativă, adică un regulator de tip Proporțional-Derivativ (PD). Pentru a îndeplini condițiile de implementare fizică se introduce și un filtru, obținând astfel regulatorul PDT1, cu funcția de reglare,

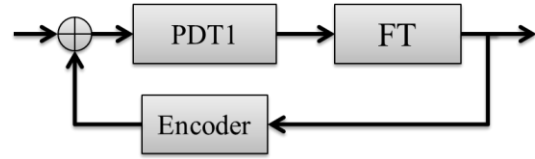


Fig. 5.11 Schema de reglare a poziționării servomotorului

$$G_R(s) = \frac{K_R(sT_d+1)}{sT_i+1} \quad (5.17)$$

în care, T_d reprezintă timpul de derivare, T_i – timpul de întârziere.

Pentru implementarea numerică și prin componente electronice, funcția de transfer a sistemului în buclă închisă, se determină cu relațiile:

$$G_d(s) = \frac{K_R K_M (sT_d+1)}{s(sT_i+1)(sT_m+1)} = \frac{K_R K_M}{s(sT_i+1)} \quad (5.18)$$

Considerând $T_d = T_m$, pentru a compensa constanta de timp din proces, rezultă relația,

$$G_0(s) = \frac{G_d(s)}{1+G_d(s)} = \frac{K_R K_M}{s^2 T_i + s + K_R K_M} = \frac{\frac{K_R K_M}{T_i}}{s^2 + \frac{1}{T_i} s + \frac{K_R K_M}{T_i}} \quad (5.19)$$

Proiectarea regulatorului are la bază criteriul modulului care asigură un suprareglaj, $M_v = 4,3\% < 5\%$. Prin egalarea funcției de transfer rezultată cu funcția de transfer în circuit închis ideal, conform criteriului modulului, ce impune $\zeta = 1/\sqrt{2}$, s-a obținut sistemul de ecuații,

$$\begin{cases} G_0(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_0 s + \omega_0^2} \\ \omega_0^2 = \frac{K_R * K_M}{T_i} \\ \frac{1}{T_i} = \sqrt{2}\omega_0 \end{cases} \quad (5.20)$$

din care, ținând cont și de relația (5.12), rezultă,

$$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_0} = 8 T_i \quad (5.21)$$

$$K_R = \frac{\omega_0^2 T_i}{K_M} = \frac{1}{2T_i K_M} = \frac{1}{2T_s K_M} = \frac{8}{2T_s K_M} = \frac{4}{T_s K_M} \quad (5.22)$$

Din aceste relații, considerând suprareglajul 500 ms, rezultă, $T_i = T_s/8$, parametrii de

proces: $T_s = 0,5$ s, $K_m = 670.2\pi/60$ rad/s și $T_m = 0,08$ sec, parametrii regulatorului: $K_R = 0,114$, $T_i = 0,0625$ s și $T_d = 0,08$, și funcția de transfer a regulatorului:

$$G_R(s) = \frac{0,114(0,08s+1)}{0,0625s+1} \quad (5.23)$$

Pentru a realiza o implementare a regulatorului într-un microcontroler se realizează discretizarea regulatorului PDT1, și, ca urmare a aplicării metodei operațională de analiză și sinteză a sistemelor cu eșantionare cu ajutorul transformării liniare Z^{-1} ce presupune substituția $s = (1-z^{-1})/T_e$, în care $T_e = 0.073$ s, reprezintă perioada de eșantioare, și a utilizării metodei seriilor de puteri, se obține ecuația cu diferențe [Comnac, 2008],

$$u[k] = -a_1 u[k-1] + b_0 e[k] + b_1 e[k-1], \quad (5.24)$$

unde,

$$a_1 = -\frac{T_i}{T_i + T_e} = -0,7576, \quad (5.25)$$

$$b_1 = -\frac{T_d K_R}{T_i + T_e} = -0,1106, \quad (5.26)$$

$$b_0 = \frac{T_d + T_e}{T_i + T_e} = 0,1382. \quad (5.27)$$

Forma finală a relației (5.24), după înlocuirea parametrilor a_1 , b_1 și b_0 , devine,

$$u[k] = -0,7576 * u[k-1] + 0,1382 * e[k] - 0,1106 * e[k-1]. \quad (5.28)$$

Această relație stă la baza implementării regulatorului printr-un microcontroler Arduino care realizează controlul servomotorului de tensionare a fibrei de carbon (v anexa 4).

5.2.3.3. SIMULAREA ȘI TESTAREA REGULATORULUI DE POZIȚIONARE A MOTORULUI DE TENSIONARE

Sistemul de reglare a acționării dispozitivului de tensionare proiectat și algoritmul obținut au fost testate în mediul virtual de simulare, utilizând funcții Matlab și modelul Simulink. În fig. 5.14 se evidențiază că cele două rezultate (teoretice și experimentale) sunt

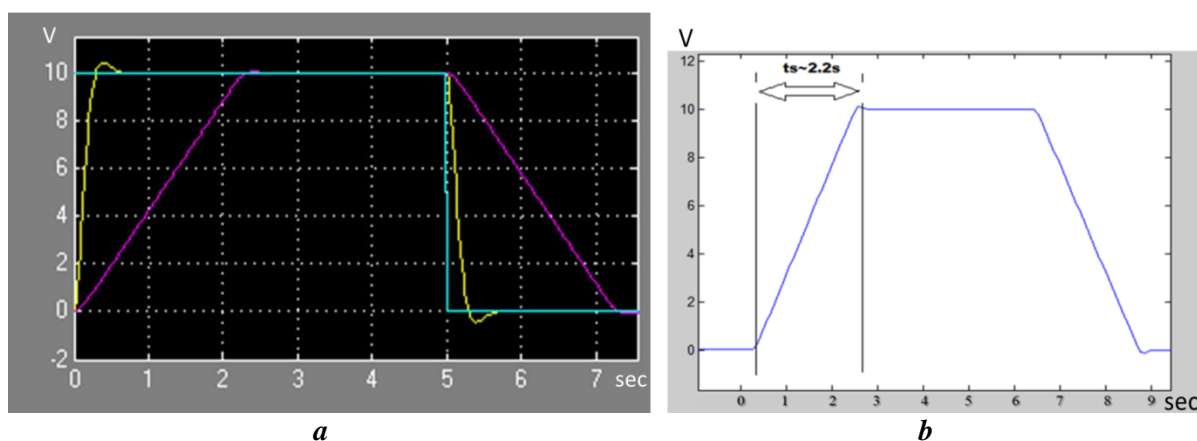


Fig. 5.14 Rezultatele implementării regulatorului de control a motorului de tensionare: **a** - simulare, **b** - teste reale

similare, fiind prezentate comparativ rezultatele simulării în Simulink a sistemului cu regulator (5.14,a), cât și ale sistemului cu regulator implementat în controlerul Arduino (fig 5.14,b) și măsurării mărimilor fizice obținute la o tensiune de alimentare. Astfel, ca urmare a comenzii de alimentare de 10 V în treaptă (marcată cu albastru), se observă că tensiunea (marcată cu roșu) ajunge la valoarea de stabilizare după 0,3 s cu un mic suprareglaj și răspunsul de stabilizare a poziției (marcat cu roz în fig. 5.14,a și cu albastru în fig. 5.14,b), datorită limitării tensiunii de alimentare, atinge valoarea treaptă după, $T \sim 2,5$ s.

5.2.3.4. ALGORITM DE REGLARE DINAMICĂ A TENSIONĂRII

Considerând că problema poziționării servomotorului a fost rezolvată prin intermediul regulatorului de poziție propus anterior, în continuare se impune implementarea unui sistem de reglare a tensionării fibrei de carbon, pe baza forței de referință impuse în fiecare moment de timp (F_r) și a forței citite de la senzorul de forță (F_a), rezultatul fiind viteza unghiulară ($\omega(s)$) dorită pentru servomotorul care controlează bacul de tensionare a fibrei de carbon.

Tensionarea (forța) impusă este cunoscută pentru fiecare valoare a arcului de cerc format de trei puncte de traiectorie a robotului de înfășurare. Pentru acest studiu am considerat pentru regulatorul de tensionare că nu cunoaște poziția următoare a robotului, astfel nu se poate face o reglare predictivă a tensionării, fiind necesară implementarea unui regulator de tensionare a fibrei de carbon.

Plecând de la ipoteza ca la poziția de referință zero, a motorului de deplasare a bacului de tensionare a fibrei, forța aplicată asupra fibrei este maximă, se impune considerarea ecuației de transformare a forței în poziție,

$$PMV0 = \frac{10 F_a}{F_r}, \quad (5.29)$$

în care, $P0$ reprezintă poziția servomotorului de tensionare, F_r - forța de referință impusă de utilizator, F_a - forța curentă măsurată la primele teste; această forță se multiplică încă de la început cu un factor de amplificare egal cu 10, pentru a avea un răspuns mai rapid al sistemului de reglare. Pornind de la forma relației de transformare, (5.29), în funcție de rezultatele testelor experimentale realizate, aceasta s-a îmbunătățit continuu, adăugând alte constante, sau factori de amplificare (v. subcap. 7.3).

5.3. CONCLUZII

În cadrul acestui studiu, pornind de la analiza critică a principiilor de funcționare a celor mai utilizate metode de tensionare până în prezent, se concepe și proiectează o soluție nouă care se implementează pentru o tehnologie robotizată, de asemenea, studiată teoretic și experimental. Astfel, s-a propus un dispozitiv nou de tensionare, care se montează în întregime în capul de înfășurare al robotului industrial. Pentru implementarea acestui dispozitiv a fost identificat modelul matematic al procesului de înfășurare cu tensionare și algoritmi de control și comandă ai subsistemului mecatronic. Prin intermediul unui algoritm de reglare a poziției servomotorului de curent continuu al acestui dispozitiv de tensionare, modelat și simulat cu ajutorul pachetelor Matlab și Simulink, s-a dezvoltat regulatorul PDT1 care a fost testat și experimental. Pentru a dezvolta sistemul în buclă închisă de control a tensionării fibrei de carbon a fost necesar integrarea unui subsistem de măsurare a forțelor de tensionare care apar în procesul de înfășurare.

Subsistemul de tensionare a fibrei de carbon cu cele două componente, senzorul de forță și dispozitivul automat de tensionare a fibrei de carbon, supervizate de controlerul master al sistemului de înfășurare a fost integrat în sistemul celor doi roboți colaborativi care formează o structură tehnologică compactă.

6. SISTEM CU ROBOȚI COLABORATIVI PENTRU ÎNFĂȘURAREA FIBRELOR (SROC-ÎNF)

Pentru realizarea structurilor complexe (3D) din materiale compozite, în cadrul studiilor din această lucrare se propune un sistem cu doi roboți industriali (ABB IRB 1600 și ABB IRB 2400), parcurgând etapele de concepție, proiectare, dezvoltare și implementare.

În fig. 6.1 se prezintă structura generală a SROC-ÎNF, compus din doi roboți industriali (1, 6), capul de înfășurare (2) care preia fibra de la sistemul de alimentare (7), cuptorul (3) pentru uscarea piesei rezultate, matrița (8), matrița de rezervă (4), pregătită în paralel cu procesul de către operatorul (5). În structura capului de înfășurare este integrat dispozitivul de tensionare prezentat detaliat în cap. 5.

SROC-ÎNF este conceput să realizeze structuri compozite care presupun înfășurarea cu un singur robot a fibrei într-o matriță fixată într-un dispozitiv auxiliar, aceasta fiind, dacă este necesar, rotită cu un sistem perirobotic, sau într-o matriță ce implică poziționări secvențiale, sau chiar continue, prin intermediul celui de-al doilea robot. Astfel, în ultimul caz, prin cooperarea a doi roboți se realizează structuri compozite 3D cu complexitate mărită, față de cele obținute cu un robot care, de obicei, sunt 2D sau 2,5D și pentru realizare, în plus, implică și un subsistem perirobotic personalizat pentru fiecare tip de matriță.

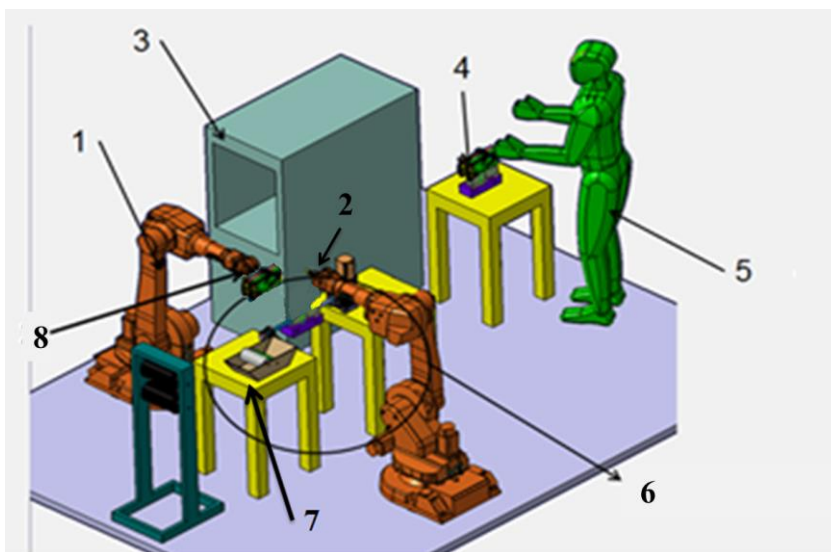


Fig. 6.1 Structura generală a SROC-ÎNF

6.1. STRUCTURA HARDWARE A SROC-ÎNF

În cadrul SROC-ÎNF, unul dintre roboți susține matrița în poziții intermediare accesibile înfășurării, iar celălalt robot realizează înfășurarea, pentru fiecare poziție intermediară. Robotul ABB IRB 1600, care realizează înfășurarea este dotat cu capul de înfășurare-tensionare montat pe flanșa acestuia (v. cap.5).

În cadrul acestui studiu se propune, un sistem integrat (fig. 6.2), care include un robot de înfășurare a fibrei, un robot de poziționare a matriței, subsistemul de înfășurare-tensionare a fibrei, în cadrul aceleiași platforme de comandă și control. Robotul de înfășurare integrează și un senzor de măsurare a forței de tensionare a fibrei ce transmite informații unui analizor de forțe care prelucrează datele primite și le transmite controlerului master, care ia decizii privind traiectoriile ambilor roboți și poziția arborelui servomotorului din cadrul

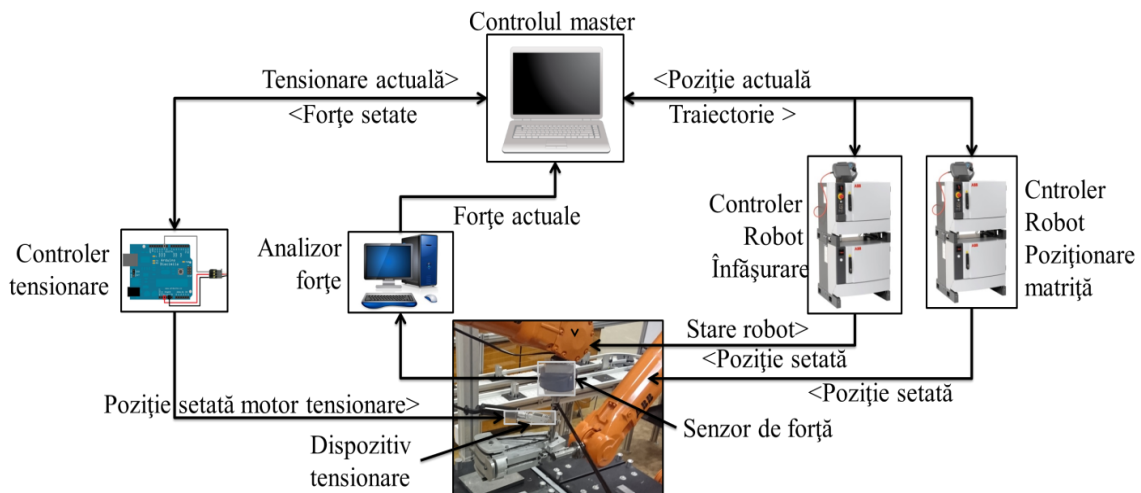


Fig. 6.2 Schema bloc funcțională a SROC-ÎNF

subsistemului de tensionare, astfel încât tensiunea (efortul) din fibră în timpul procesului de înfășurare să ia valori conform unei diagrame de tensionare (v. subcap. 4.3).

6.1.1. SUBSISTEMUL DE ALIMENTARE CU FIBRĂ

În cazul aplicației din această lucrare, fibra de carbon fiind neimpregnată, s-a dezvoltat un subsistem de alimentare și impregnare cu fibră, procese necontrolate extern în cadrul acestei variante, format din rola de alimentare cu fibră de carbon, baia cu rășină și role de ghidare (fig. 6.4).

Poziția rolei de alimentare cu fibră de carbon influențează posibilitățile de înfășurare

cu roboți, conform unei traiectorii impuse, corelate cu dispozitivul de tensionare ales. Astfel, pentru cazul dispozitivului de tensionare propus, pentru acest studiu, rola de alimentare se plasează în afara spațiului de lucru al roboțiilor, fapt ce oferă posibilitatea operatorului de a o schimba cu ușurință și în siguranță.

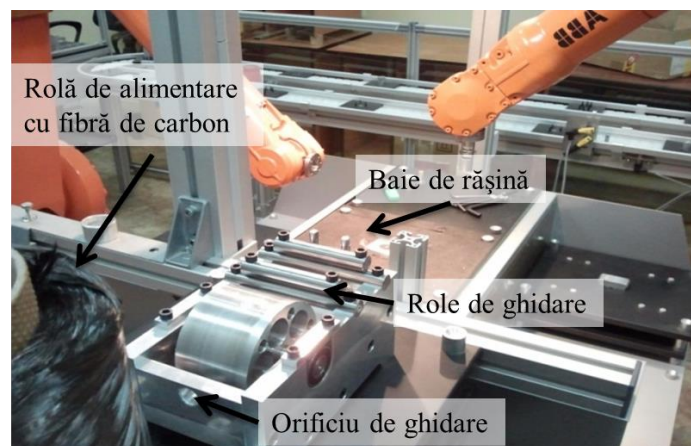


Fig. 6.4 Subsistemul de alimentare cu impregnare a fibrei de carbon

6.1.2. SUBSISTEMUL ROBOTIC COLABORATIV DE ÎNFĂȘURARE

Robotul de înfășurare din acest studiu este un robot ABB IRB 1600x-145 cu șase grade de libertate. Acesta este controlat de un controler IRC5. Traectoria inițială a robotului este generată și simulată offline folosind pachetul Robot Studio, ulterior, după ce este ajustată, este transferată controlerului robotului. Prin intermediul sistemelor de control dezvoltate în acest studiu, comunicația implementată poate avea și rolul de a impune robotului de înfășurare corecții de traiectorie, astfel robotul de înfășurare devenind un sistem condus, sclav, al controlerului master.

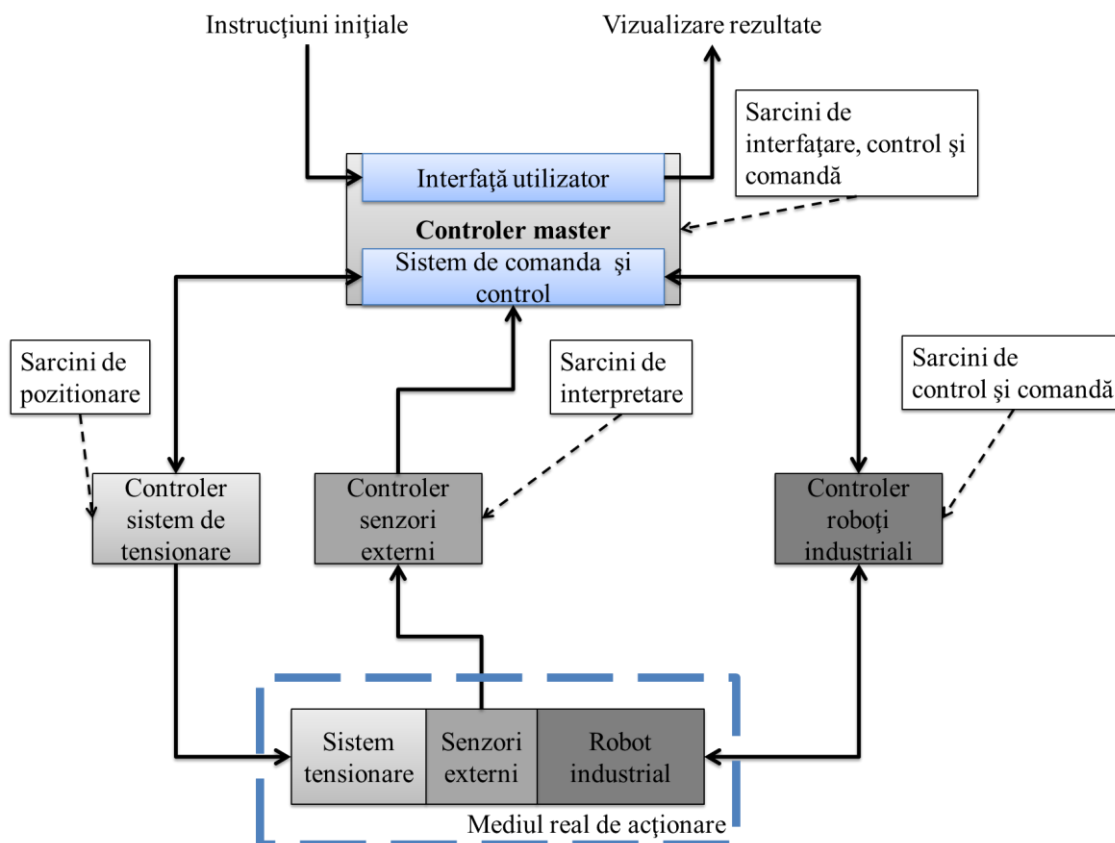


Fig. 6.6 Schema bloc a sistemului de colaborare a roboților pentru procesul de înfășurare a fibrei cu tensionare

Matrița considerată în cadrul acestui studiu are un traseu de așezare a fibrei, spațial (3D), complex, care nu poate fi urmărit de un robot, considerând-o fixă și, astfel, s-a recurs la soluția integrării celui de-al doilea robot care să manipuleze și să țină matrița, în timp ce primul robot realizează înfășurarea fibrei. Pentru aceste operații s-a implementat al doilea robot industrial, ABB IRB 2400L, de asemenea, controlat de un controler IRC5.

Cei doi roboți pot conlucra pentru realizarea sarcinilor prin intermediul controlerului master, care îi consideră pe cei doi roboți executanți (sclavi), aceștia executând operațiile transmise de către master prin intermediul controlerelor roboților industriali și returnând către controlerul master răspunsuri de stare (fig. 6.6).

6.2. SISTEMUL DE CONTROL ȘI COMANDĂ

6.2.1 CONTROLERUL MASTER

Conducerea celor doi roboți și a dispozitivelor auxiliare pentru derularea procesului de obținere a structurii din fibră de carbon se poate face pe principiul de *control master-slave*, în care unul dintre roboți preia informații și propune acțiuni, iar celălalt urmărește și execută comenzile. Controlerul master calculează valorile efortului de tensionare în diverse puncte de pe traiectorie și comandă a servomotorului de tensionare, în paralel cu procesul de înfășurare.

În fig. 6.8 se prezintă interfața controlerului master cu utilizatorul, proiectată pentru a putea fi utilizată cu ușurință de operatorii fără experiență în programare, dar care totuși trebuie să cunoască date generale despre roboți, precum și despre procesele de înfășurare și tensionare a fibrei. Această interfață este structurată pe module, în funcție de subsistemele componente și acțiunile desfășurate de acestea.

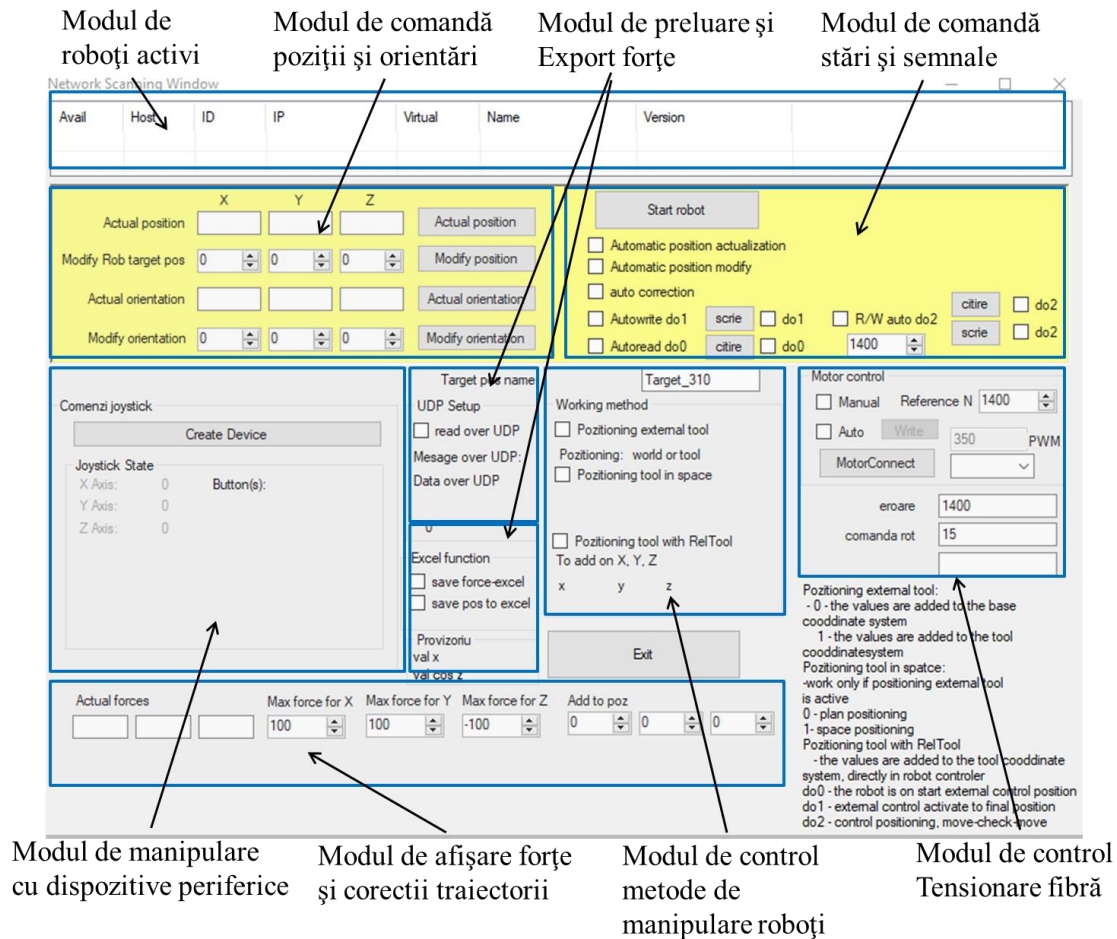


Fig. 6.8 Interfața cu utilizatorul a controlerului master

6.2.2 ALGORITMI DE COMUNICAȚIE

Pentru funcționarea coerentă a sistemului robotic de înfășurare cu tensionare a fibrei de carbon este nevoie de sincronizarea tuturor subsistemelor existente. Acestea sunt supervizate de către controlerul master în fiecare moment prin intermediul unor protocoale de comunicații și algoritmi de control și comandă. Calculator principal, gazda controlerului master, comunică cu controlerul roboților prin intermediul protocolului de comunicare TCP/IP, în timp ce comunicația dintre calculatorul secundar care înregistrează datele de la senzorul de forță și controlerul master se realizează prin intermediul protocolului de comunicație UDP, iar legătura cu controlerul dispozitivului de tensionare se realizează prin intermediul unei comunicații de tip serial.

Având în vedere că tehnologiile de comunicație utilizate în acest studiu sunt diferite pentru fiecare dintre subsistemele componente, a fost nevoie să se dezvolte algoritmi de comunicație specifici fiecărui tip de dispozitiv.

6.2.3 ALGORITMI DE CONTROL ȘI COMANDĂ

6.2.3.1 ALGORITMI DE CONTROL A TRAIECTORIEI

Pentru urmărirea traiectoriei s-a impus o corelare a forțelor măsurate prin senzorul de forță cu valori ale pozițiilor efectorului (capul de înfășurare) raportate la sistem de coordonate

Alg. 6.6 Calculul pozițiilor roboților prin aplicarea cinematicii inverse

```

// Pentru fiecare punct de coordonate se calculează valoarea dorită
// prin intermediul aplicării formulelor de cinematică inversă
X = x0 + Cos(phiy1) * Cos(phiz1) * dx - Cos(phiy1) * Sin(phiz1) * dy
+ Sin(phiy1) * dz;
//
Y = y0 + (Sin(phix1) * Sin(phiy1) * Cos(phiz1) + Cos(phix1) *
Sin(phiz1)) * dx + (- Sin(phix1) * Sin(phiy1) * Sin(phiz1) +
Cos(phix1) * Cos(phiz1)) * dy - Sin(phix1) * Cos(phiy1) * dz;

Z = z0 + (-Cos(phix1) * Sin(phiy1) * Cos(phiz1) + Sin(phix1) *
Sin(phiz1)) * dx + (Cos(phix1) * Sin(phiy1) * Sin(phiz1) + Sin(phix1)
* Cos(phiz1)) * dy + Cos(phix1) * Cos(phiy1) * dz;
//
    robottarget.X = X;
    robottarget.Y = Y;
    robottarget.Z = Z

```

propriu. Din acest motiv a fost conceput și implementat alg. 6.6 de conversie, prin aplicarea relațiilor cinematicii inverse pentru a afla poziția țintă față de poziția curentă.

Alg. 6.7 Algoritm de reglare a tensionării fibrei de carbon și transmitere către subsistemul de tensionare

```

// algoritm de reglare automată, a tensionării fibrei, identificat
// prin teste experimentale, rezultând un regulator de tip PI
comandaRot=0; //numar rotații robot pentru reglare
comandaRotMaxima = 15; //unitate de măsură: rotații, descrie
// situația în care firul este strâns maxim (15), sau complet eliberat (-15)
eroareMaxima = 2000; // unitate de măsură:N/10, descrie eroarea
// maximă de forță care poate apărea în sistem
comandaRotMotor=0; //număr rotații robot pentru reglare
a1 = -1; //parametru regulator tip PI
perioadaEsantionare = 0.073;
Ti = 10; // constantă integrare
FUNCTIE REGLARE ()
{
    // regulator forță poziție
    TensiuneDorita = Referinta_N.Value;
    factorAmplificare = 5 * ( comandaRotMaxima / eroareMaxima);
    b1 = -1 * factorAmplificare;
    b0 = factorAmplificare * (1 + (perioadaEsantionare / Ti));
    TensiuneActuala = Sqrt(xUDP * xUDP + yUDP * yUDP + zUDP * zUDP);
    eroareTensiune = TensiuneDorita - TensiuneActuala;
    comandaRot = -a1 * comandaRotPrev + b0 * eroareTensiune + b1 *
eroareTensiunePrev;
    comandaRotPrev = comandaRot;
    eroareTensiunePrev = eroareTensiune;
    DACA (comandaRot > comandaRotMaxima)
    {
        comandaRot = comandaRotMaxima; }
    DACA (comandaRot < (-1 * comandaRotMaxima))
    {
        comandaRot = (-1 * 17); }
    comandaRotMotor = -comandaRot;
//transmitere valoare poziție către subsistemul de tensionare
    DACA (TRANSMISIE POZITIE= ACTIVAT)
    {
        PWM = comandaRotMotor;
        Scriere port( PWM);
    }}

```

6.2.3.2 ALGORITMI DE CONTROL A TENSIONĂRII FIBREI

Tensionarea fibrei de carbon cu un dispozitiv integrat în capul de înfășurare se realizează prin aplicarea unei presiuni controlate asupra acesteia. Presiunea se aplică prin apăsarea unor bacuri în direcție perpendiculară pe fibră prin acționarea unui servomotor de curent continuu care, antrenează un șurub ce transformă mișcarea de rotație în mișcare de translație (v. subcap. 5.2).

Pentru reglarea tensionării fibrei s-a conceput și dezvoltat alg. 6.7 care în urma testelor a suferit ajustări, în ceea ce privește valorile unor parametri, modificări prezentate în capitolul de studii experimentale (v. subcap. 7.3). Astfel, s-a optat pentru implementarea unui regulator PI ai cărui parametri standard au fost identificați prin teste experimentale, fiind imposibil de identificat funcția de transfer pe baza modelului matematic, aceasta fiind diferită în fiecare punct al traiectoriei. Factorul de amplificare obținut ca raport între valoarea maximă a turației pe care are o poate atinge motorul și eroarea maximă de forță care se presupune că ar putea apărea, s-a corectat prin adăugarea unei constante de multiplicare în urma testelor.

6.3 PACHETE SOFTWARE FOLOSITE

Pentru a crea conexiuni ale roboților cu diverse dispozitive hardware, sunt utilizate softurile pentru programarea roboților, în cazul de față pachetul RAPID prin intermediul platformei Robot Studio. Programul RAPID este format dintr-un număr de instrucțiuni care comandă acțiuni robot. Astfel, sunt instrucțiuni specifice pentru diferite comenzi, precum cele de mișcare a robotului sau de setare a unei ieșiri digitale din controler, cu un număr de argumente care definesc parametrii din instrucțiunea specifică.

Un alt mediu de programare utilizat în dezvoltarea controlerului master, folosind platforma de tip SCADA, este C#, în special pachetul PC SDK-ul folosit pentru a programa comenzile pentru roboți. Scopul PC SDK este de a dezvolta aplicații pentru a analiza, controla sau modifica comportamentul unui robot industrial ABB. Versiunea 5.13 a pachetului PC SDK, folosită pentru aplicațiile practice din acest studiu, permite modificarea variabilelor din interiorul programului RAPID și, în plus, permite și vizualizarea semnalelor de intrare-ieșire, funcțiile și modulele RAPID, fișierele din controler, înregistrările de evenimente, stările controler-ului. Acesta funcționează atât pe Windows 2000, cât și în variante mai avansate, având obligatoriu funcția *.NET Framework 1.1*.

Pentru a răspunde cerințelor de flexibilitate și adaptabilitate pentru nevoile aplicației, ABB pune la dispoziție instrumentul, Robot Application Builder (RAB). PC SDK este o parte a acestuia, care include și utilizările corespunzătoare pentru personalizarea ecranelor operator pentru consola FlexPendant.

Pentru controlul procesului de tensionare a fibrei este implementată o aplicație de achiziții de date realizată în Visual Basic și un controler PCI care colectează informațiile de la senzorul de forță. Pentru programarea microcontrolerului utilizat pentru controlul servomotorului de tensionare s-a utilizat mediul de programare Arduino. Prin intermediul acestuia s-a implementat algoritmul de reglare a poziției țintă a servomotorului de tensionare.

6.4 CALIBRAREA ROBOȚILOR COLABORATIVI

Calibrarea roboților este o procedură de verificare și/sau de diagnosticare a acurateții de poziționare a roboților pentru sarcinile de operare impuse și, respectiv, în mentenanță. Obiectivul calibrării este de a transpune în mediul real elementele din mediul virtual, iar apoi realizarea unei corespondențe între traiectoria realizată în mediul virtual cu cea din mediul real de înfășurare.

În fig. 6.12. este prezentată schema bloc a procesului de calibrare a roboților care pornește de la sarcina primită de către un robot, analizată de planificatorul de traiectorie.

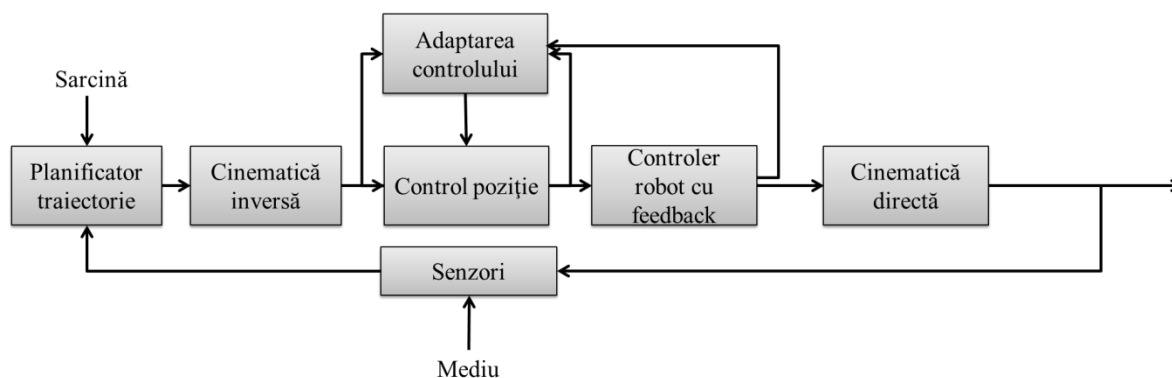


Fig. 6.12 Schema bloc a calibrării adaptive a roboților

Acesta, utilizând modelul cinematicii inverse, ia decizii, pe baza informațiilor primite de la senzori, și, generează comenzi de poziționare, care ulterior, sunt verificate și transmise în formă finală către articulațiile robotului folosind algoritmi de cinematică directă [Lange, 2005]. Prin intermediul acestui algoritm de calibrare se urmărește poziționarea roboților în mediul real similar ca în mediul virtual de simulare. Pentru cazul concret al roboților de înfășurare a fibrei și de manipulare a matriței se pornește de la poziția în mediul real a matriței suport și o poziție de referință de pe traiectoria robotului de înfășurare, identificată manual. În funcție de aceasta folosind modelul cinematicii inverse se calculează poziția robotului în spațiul de coordonate general, iar ulterior după identificarea poziției prin intermediul controlerului poziției robotului cu feedback, prin calcule de cinematică directă se realizează poziționarea robotului în mediul real.

6.5 CONCLUZII

În cadrul acestui capitol se propune un sistem de înfășurare robotizat a fibrei de carbon pentru obținerea de structuri compozite complexe. Astfel, se detaliază etapele de concepție, dezvoltare și implementare a unui sistem integrat cu roboți colaborativi, numit SROC-ÎNF, pentru procesul de înfășurare a fibrei de carbon, cu tensionare variabilă controlată automat. Pentru conducerea acestui sistem s-a conceput, dezvoltat și implementat un sistem de control și comandă ierarhizat pe mai multe nivele.

Pentru dezvoltarea și implementarea sistemului SROC-ÎNF, s-au utilizat diferite medii de programare și simulare pentru a crea, pe de-o parte, conexiuni dintre componentele hardware, și pe de altă parte, subprograme de conducere a roboților, în special, folosind pachetul RAPID prin intermediul Robot Studio. Pentru dezvoltarea controlerului master s-a utilizat platforma de tip SCADA, în C#, în special, pachetul PC SDK.

Pentru controlul în forță a tensionării fibrei la înfășurare s-a implementat o aplicație de achiziții de date realizată în Visual Basic și un controler PCI pentru achiziția și prelucrarea datelor de la senzorul de forță. Pentru programarea microcontrolerului utilizat pentru conducerea servomotorului de tensionare a fibrei s-a utilizat mediul de programare Arduino. Prin intermediul acestuia s-a implementat algoritmul de reglare a poziției servomotorului de tensionare a fibrei.

SROC-ÎNF cu tensionare controlată a fibrei la înfășurarea pe trasee în cadrul unei matrițe suport este rezultatul combinării unor subsisteme modulare care pot cu ușurință să funcționeze și să fie testate independent. Aceste subsisteme sunt integrate funcțional într-un sistem complex pentru a îndeplini sarcini simultan în paralel. Totodată se prezintă și modurile de interacțiune și interdependența între subsistemele implicate.

7. STUDII EXPERIMENTALE

7.1 CONFIGURAREA ȘI IMPLEMENTAREA MEDIILOR DE TESTARE

Scopul studiilor experimentale este de a testa sistemul de înfășurare cu tensionare controlată a fibrei cu doi roboți colaborativi, urmărind integrarea funcțională a dispozitivelor și modelelor teoretice dezvoltate anterior.

Cercetările, din cadrul acestei lucrări au început odată cu preocupările dr. ing. Thomas Heitz de la compania ThyssenKrupp Lichtenstein de a înlocui suportul coloanei de direcție a unui autovehicul, realizat din oțel prin turnare, (fig 7.1) cu o structură compozită din fibră de carbon înfășurată (fig. 7.2). Pentru realizarea acestei structuri s-a conceput și realizat matrița din fig. 7.3 în care sunt canale de așezare a fibrei prin înfășurare după o configurație spațială complexă. Încercările inițiale de a realiza înfășurarea manual au condus la performanțe reduse ale structurii din cauza înfășurării imprecise, atât privind traseele de așezare cât și tensionarea necorespunzătoare a fibrei ce conduce la zone unde aceasta are bucle sau secțiuni ale pachetului reduse. În plus, metodele manuale și semiautomate de realizare a structurilor din materiale compozite prezintă și dezavantaje legate de timpii de înfășurare ridicați, curățirea anevoioasă a matricei polimerice (rășină) și geometrii ale traseelor de înfășurare simple, de obicei plane.

În acest context compania ThyssenKrupp a apelat la Universitatea Transilvania din Brașov, laboratorul de Informatică Virtuală și Robotică, pentru a realiza înfășurarea fibrei în această matriță în mod robotizat.

Pentru realizarea de structuri din fibră de carbon înfășurată în mod automat (robotizat), folosind matrițe complexe (3D) se impune, pentru a asigura accesul în toate zonele matricei, ca procesul de înfășurare să fie realizat cu mișcarea acesteia.

Pentru dezvoltarea studiilor experimentale ca bază a unei noi tehnologii de înfășurarea a fibrei de carbon, s-a plecat de la o celulă flexibilă de manufacturare cu doi roboți, ABB IRB 2400 și IRB 1600 (fig. 7.4), existentă în cadrul Universității Transilvania Brașov [Sbanca, 2015].



Fig. 7.1 Suport coloană de direcție din oțel

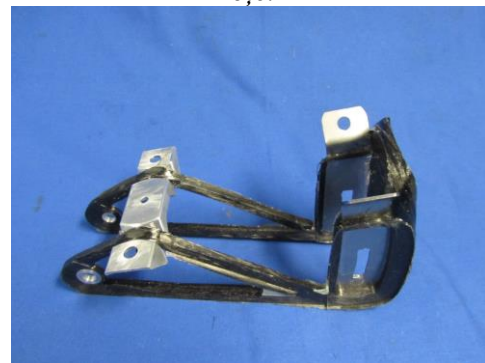


Fig. 7.2 Structură din fibră de carbon

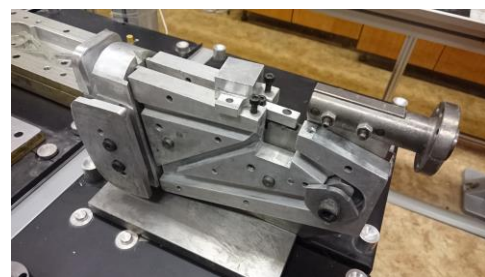


Fig. 7.3 Matriță pentru piesa din fig. 7.2

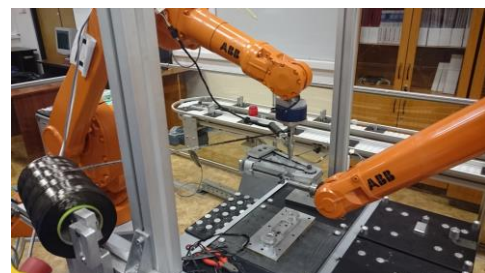


Fig. 7.4 Sistemul de înfășurare cu doi roboți colaborativi

7.2 STUDII EXPERIMENTALE DE ÎNFĂȘURARE CU TENSIONARE CU UN ROBOT

7.2.1 PLANIFICAREA EXPERIMENTELOR

Testele de înfășurare cu un robot au avut ca obiectiv principal analiza influenței forțelor de frecare din subsistemul de alimentare cu fibră de carbon, [Sbanca, 2018], și, în plus, determinarea valorilor nominale efortului de tensionare astfel încât să se obțină performanțe ridicate de rezistență ale structurii obținute [Heitz, 2013].

În cazul testelor experimentale pe care le-am realizat se presupune că rola de alimentare cu fibră de carbon este plasată în afara zonei de acționare a robotului, în același plan cu matrița suport, raportat la sistemul de coordonate al robotului [Sbanca, 2018b].

Deplasarea fibrei de la subsistemul cu rolă de alimentare până la capul de înfășurare (fig. 7.6), în cazul în care aceasta este trasă se face cu tensionare mărită (fig. 7.6,a), spre deosebire de cazul opus (deplasarea spre rola de alimentare) fibra este netensionată (fig 7.6,b) și pot apărea alunecări și/sau devieri de la traseul impus.

Rolul subsistemului de tensionare dezvoltat este de a genera o tensionare a fibrei la înfășurare cu un efort variabil conform modelului teoretic (v. subcap. 4.3), indiferent de direcția și sensul de deplasare a capului de înfășurare în raport cu rola de alimentare. Dispozitivul de tensionare (fig. 7.7), ca și componentă principală externă sistemului roboților, este plasat pe dispozitivul de înfășurare imediat după senzorul de forță montat pe robotul de înfășurare. Fibra de carbon trece prin interiorul dispozitivului de tensionare foarte aproape de zona de urmărire a traiectoriei de înfășurare.

7.2.2 REALIZAREA EXPERIMENTELOR ȘI ACHIZIȚIA DATELOR

Pentru a observa dar și a evalua diferențe, între diferite implementări ale sistemului de tensionare și a parametrilor de proces asociați acestuia, și pentru a stabili configurația nominală a sistemului de control a procesului de înfășurare au fost realizate șapte teste de înfășurare a fibrei în canalele matriței suport, cu diverse setări ale forței de tensionare. Pentru fiecare dintre cazurile propuse au fost realizate teste în două variante, prima, presupune derularea fibrei de pe rola de alimentare manual, preliminar, pentru a se face alimentarea liber fără frecările din interiorul subsistemului de alimentare, și a doua lăsând rola de alimentare în

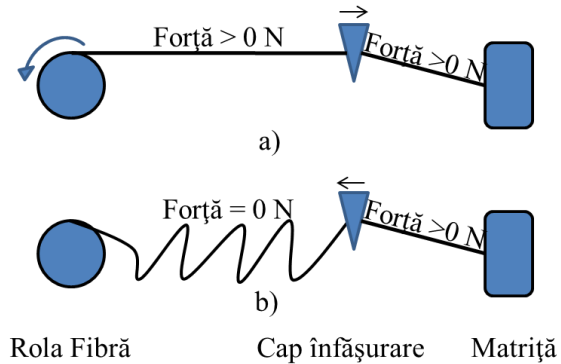


Fig. 7.6 Tensionarea fibrei la înfășurarea liberă (fără subsistem de tensionare): **a** – la tragerea din rolă, **b** – la deplasarea spre rolă

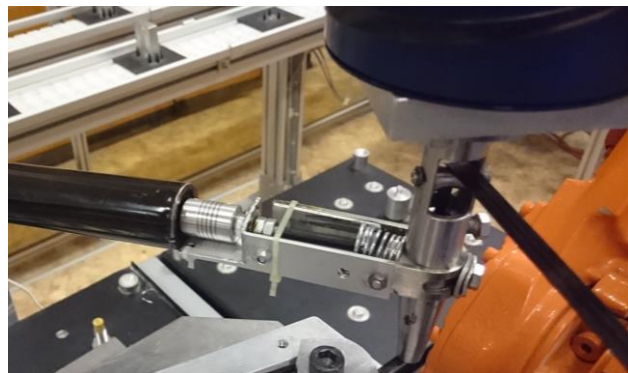


Fig. 7.7 Subsistemul de tensionare integrat în capul de înfășurare

stare naturală (derularea fibrei este făcută de robot), cu implicarea forțelor de frecare din interiorul sistemului de alimentare. Cele șapte teste experimentale realizate sunt cvasiidentice mai puțin forța de tensionare a fibrei la înfășurare programată care are valori crescătoare: 18N, 23N, 29 N și 35 N.

7.2.3 PRELUCRAREA DATELOR ȘI ANALIZA REZULTATELOR

În fig. 7.8 se prezintă variațiile forțelor măsurate de senzor pentru primul caz cu forța de tensionare 18 N. Astfel, în fig. 7.8,a se observă că în situația alimentării cu fibră liber, fără rezistențe ale subsistemului de alimentare și deci fără influențe asupra efortului din fibră în timpul înfășurării, sunt înregistrate forțe negative în direcția axei X, ceea ce înseamnă că tensionarea este indusă de legătura dintre capul de înfășurare și matrită. În situația când înfășurarea se realizează din rola de alimentare fibră, forța de tensionare (evidențiată prin componentele efortului în direcțiile X și Y), pe de-o parte, este amplificată când fibra este trasă (capul de înfășurare se îndepărtează de rola de alimentare), însemnând că cele două eforturi se cumulează având influență ambele tensionări (cea de dinainte de capul de înfășurare, din subsistemul de alimentare, și cea din capul de înfășurare), și pe de altă parte, se reduce la valori negative, după ce se schimbă sensul de deplasare a capului de înfășurare (spre rola de alimentare).

În tab. 7.1 sunt prezentate sintetic rezultatele celor șapte variante de teste experimentale, inclusiv lungimea totală a fibrei înfășurată pentru fiecare caz de tensionare și, respectiv, varianta de alimentare: cu fibră liberă (fără rolă de alimentare) și cu influențe date de sistemul de alimentare. Comparând rezultatele obținute, în cazul în care forța programată crește, lungimea totală a fibrei scade. În varianta cu influențe din partea sistemului de alimentare cu fibră, se evidențiază efectul tensionării indusă de subsistemul de alimentare, lungimea fibrei înfășurată este redusă. Testele din acest studiu evidențiază scăderea lungimii fibrei înfășurată (creșterea densității pachetului de fibră) cu creșterea valorii efortului de tensionare, astfel, conform cazului trei în care forța de tensionare programată a fost crescută

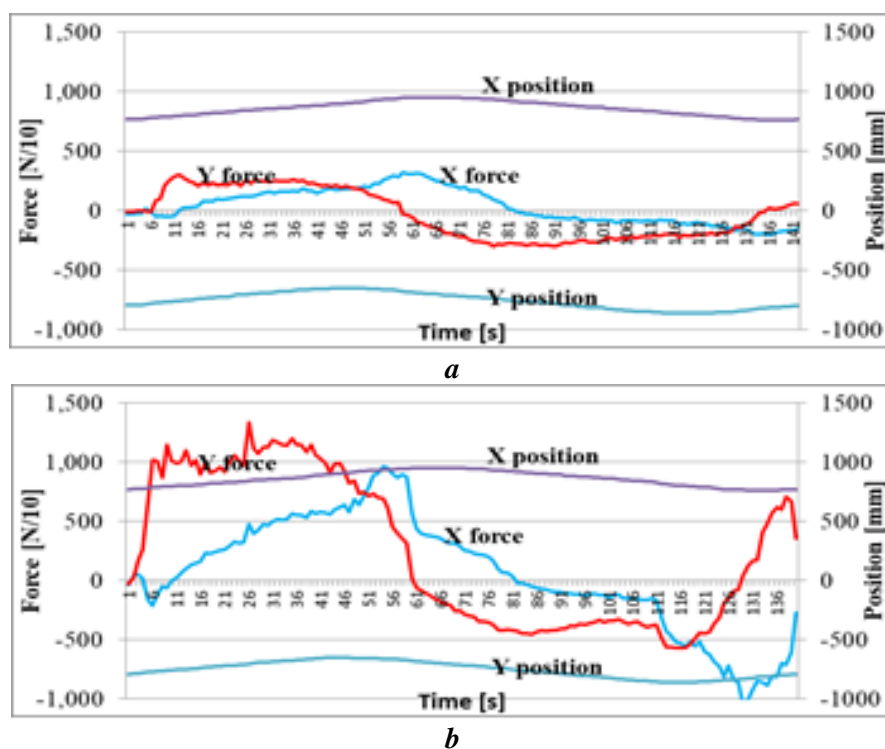


Fig. 7.8 Forțele din fibra de carbon la tensionarea cu 18 N, *a* – alimentare cu fibră liberă (fără subsistem de alimentare), *b* - cu sistem de alimentare

Tab. 7.1. Rezultatele testelor experimentale privind influența subsistemului de alimentare asupra tensionării

Cazul	Forța programată [N]	Varianta de test	Efortul indus de subsistemul de alimentare [N]	Lungimea fibrei [mm]
1	19	1	-	413
		2	10	410
2	23	3	-	412
		4	10	409
3	29	5	-	411
		6	10	403
4	35	7	-	406

cu 50 % față de cazul unu, a rezultat scăderea lungimii fibrei înfășurată cu 2 % .

În urma testelor experimentale se identifică parametri nominali ai procesului de înfășurare - care să răspundă cerințelor tehnice de calitate - precum, traseul de urmat sau temperatura nominală pentru uscarea piesei rezultate. Se evidențiază, de asemenea, faptul că placile de presare nu au un efect important asupra piesei finale, același rezultat putând fi obținut dacă fibra este tensionată corect.

7.3 STUDII EXPERIMENTALE DE ÎNFĂȘURARE CU TENSIONARE CONTROLATĂ CU DOI ROBOȚI

7.3.1 REALIZAREA EXPERIMENTELOR ȘI ACHIZIȚIA DE DATE

Testele experimentale de înfășurare robotizată a fibrei cu tensionare controlată au fost realizate pentru matrița 3D cu grad ridicat de complexitate (v. fig. 7.3), susținută și manipulată de un robot, aflat în colaborare cu brațul robotic de așezare controlată a fibrei în canalele matriței.

Testele experimentale din această etapă au fost realizate utilizând dispozitivul de tensionare care integrează în controlerul propriu subsistemul de reglare al poziției motorului prezentat în subcap. 5.2.

Procesul de colaborare a roboților se manifestă prin sesiuni successive de înfășurare realizate de un robot, urmate de rotirea matriței de celălalt robot pentru a se putea continua înfășurarea (fig. 7.12). Controlul tensionării fibrei de carbon este realizat și în timpul rotirii matriței pentru a asigura o nouă poziție de înfășurare.

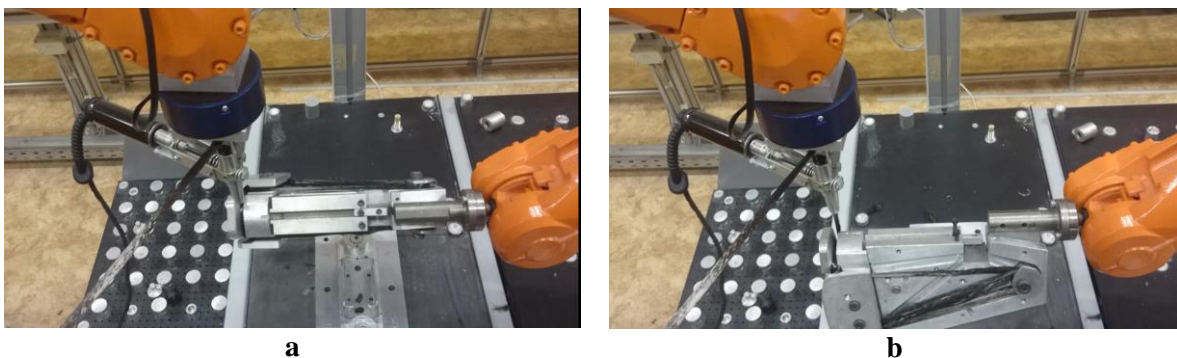


Fig. 7.12 Poziții ale matriței suport: **a** - orizontal, **b** - vertical

7.3.2 PRELUCRAREA DATELOR ȘI ANALIZA REZULTATELOR

Preliminar, au fost realizate trei teste experimentale, pentru calibrarea subsistemului de reglare a tensionării pentru înfășurarea fibrei pentru așezarea în canalele matriței urmărind atingerea punctelor traiectoriei programate, doar o singură dată (fără repetare).

Primul test experimental realizat, adoptând forța de tensionare programată 5 N, a fost considerat ca fiind de referință. Celelalte două teste au fost realizate modificând valoarea forței la 10 N, respectiv, 15 N, fără a modifica alți parametri de proces. S-a început cu valori mai mici ale tensionării nominale pentru a se încerca stabilizarea sistemului pe întreaga traiectorie.

Relația de calcul a poziției motorului de tensionare, determinată și experimental, stă la baza unui regulator proporțional, bazat pe o constantă de amplificare a forței măsurată de senzorul de forță. În urma realizării celor trei teste experimentale această relație este corectată și devine,

$$PMV1 = PMV0 + K_1 \frac{F_a - K_4}{F_m}, \quad (7.1)$$

$$PMV2 = PMV0 + K_2 \frac{F_a - K_4}{F_m}, \quad (7.2)$$

$$PMV3 = PMV0 + K_3 \frac{F_a - K_4}{K_4}, \quad (7.3)$$

în care, PMV0 reprezintă poziția servomotorului de tensionare de referință conform relației (5.29), PMV1, PMV2, PMV3 - pozițiile motorului dispozitivului de tensionare pentru cele trei teste, F_a - forța curentă măsurată de senzorul de forță, F_r - forța de referință impusă de utilizator și F_m - forța medie măsurată până la cazul curent. Valoarea constantei $K_4 = 1200$, determinată empiric prin observații experimentale, este introdusă pentru ca a doua parte a relațiilor de calcul a regulatorului să aibă influențe mici, deci pentru a asigura o ajustare fină a poziției motorului de tensionare a fibrei. În relațiile (7.1) și (7.2) valorile de multiplicare, $K_1 = 5$ și, respectiv $K_2 = 10$, sunt aplicate raportului dintre forța curentă și forța medie măsurată pentru a amplifica valorile regulatorului cu scopul de a reacționa mai repede la schimbările apărute. Relația de calcul a poziției motorului de tensionare (7.3), nu mai ține cont de forța medie măsurată, ci folosește o valoare constantă, K_4 , dar ține cont de forța curentă care este amplificată cu factorul $K_3 = 12$.

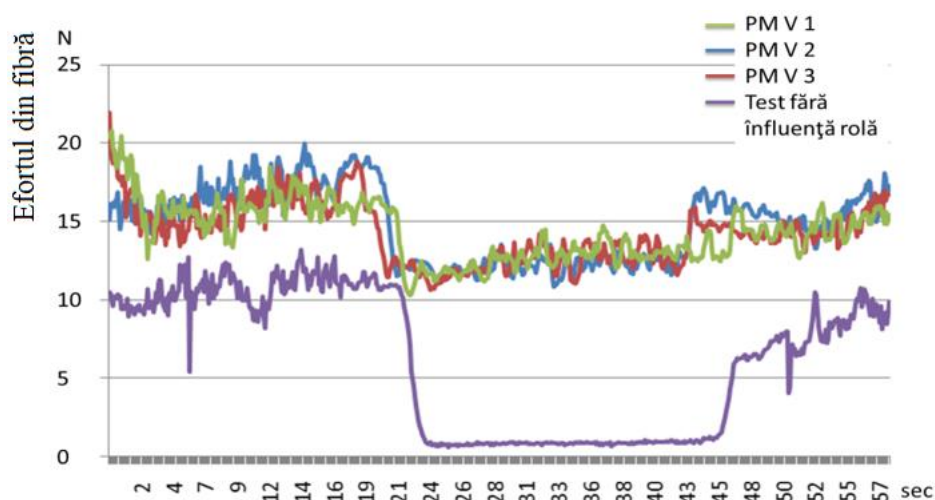


Fig. 7.13 Rezultatele testelor experimentale de înfășurare cu fibră tensionată, obținute la calibrare

Tab. 7.3. Parametrii de proces aplicați regulatorului de tip proporțional (P) pentru tensionarea fibrei de carbon

Parametru	Pozițiile motorului de tensionare				
	PMPV1	PMPV2	PMPV3	PMPV4	PMPV5
R_m	10	15	20	10	15
E_m	2000	2000	2000	1300	1300
F_r	1400	1400	1400	1400	1400

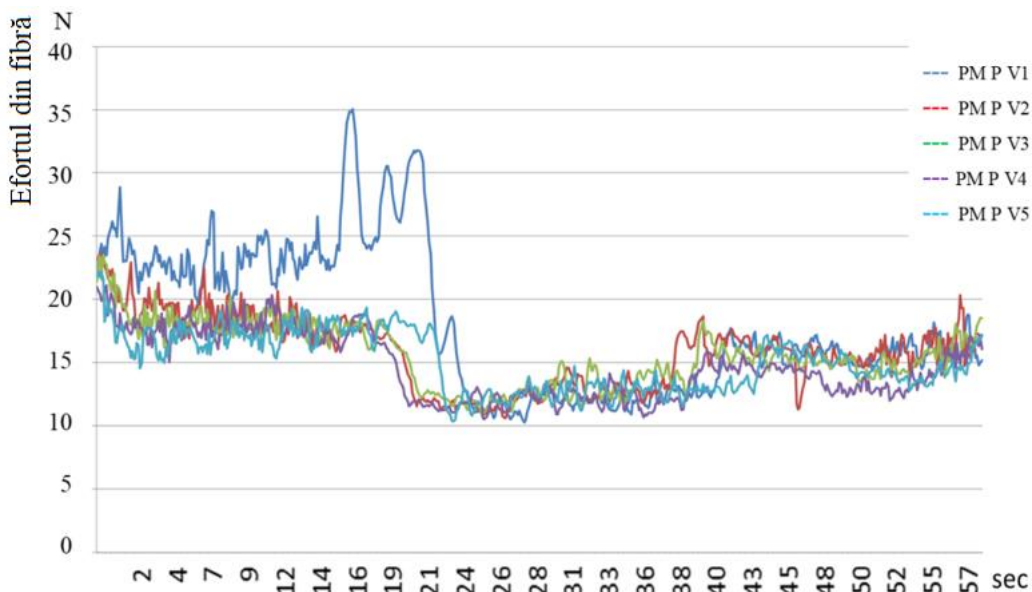
În fig. 7.13 se prezintă variațiile efortului din fibră măsurat în cele trei teste experimentale pentru o perioadă de aprox 60 s. În plus, s-a adăugat și un test în care nu se aplică nici o tensionare asupra fibrei de carbon prin intermediul sistemului de tensionare automat (valoarea programată este zero). Astfel, se observă, pentru cazul în care sistemul de pretensionare nu este activ, că efortul de forță din fibră oscilează foarte mult în jurul valorii 10 N, evidențiind perioada în care sistemul de alimentare cu fibră acționează ca o perturbație indusă de rola de alimentare cu fibră de carbon și baia de rășină;

În continuare, se propune utilizarea unui regulator de tip Proporțional clasic (P) sau Proporțional-Integrator (PI) pentru a regla cu mai mare finețe tensionarea fibrei de carbon. Efortul de forță de referință fiind setat la valoarea de 15 N, descrierea modului de calcul a poziției transmise (PM) către servomotorul de tensionare a fibrei se face cu relațiile sistemului,

$$\begin{cases} PM = \text{Amp } F_e \\ F_e = F_r - F_a \\ \text{Amp} = \frac{R_m}{E_m} \end{cases}, \quad (7.4)$$

în care, Amp reprezintă factorul de amplificare al regulatorului, R_m - numărul maxim de rotații ale motorului dispozitivului de tensionare, E_m - eroarea forței maxime din sistem, F_e - eroarea forței calculată ca diferență între forța de referință, F_r , și forța curentă măsurată, F_a . Pe baza acestor relații au fost realizate cinci teste experimentale de înfășurare cu controlul tensionării fibrei de carbon, utilizând pentru parametrii din sistemul de ecuații (7.4) valorile din tab. 7.3.

În fig. 7.14 se prezintă rezultatele celor cinci teste experimentale. În cazul poziționării

**Fig. 7.14** Rezultatele testelor experimentale de înfășurare cu tensionare controlată a fibrei, utilizând regulator de tip P

motorului cu regulator de tip Proportional (PMP), testul numărul trei (V3) are cele mai bune rezultate deoarece se poziționează cel mai aproape de efortul nominal impus, 15 N; media valorilor obținute pentru acest regulator în timpul măsurătorilor de 60 secunde este de 16.4 N. Chiar dacă, pe de-o parte, abaterile sunt încă destul de mari, între +10 N și -5 N față de referință, și există o pierdere de tensiune la schimbarea direcției de deplasare a robotului de înfășurare, pierderea de tensiune este cea mai mică, 5 N față de referință, pe de altă parte, pierderea de tensiune este cea mai lentă, aceasta scăzând cu 5 N pe parcursul a 5 secunde, comparativ cu rezultatele prezentate în fig. 7.13, în care scăderea de 5 N are loc în doar 2 secunde. La polul opus se situează testul unu (V1), în care se evidențiază oscilații foarte mari ale efortului din fibră, care pot conduce, pe de-o parte, chiar și la ruperea fibrei sau, pe de altă parte, la valori de tensionare mărite apropiate de limitele admise de subsistemul de tensionare.

Pentru a obține rezultate și mai bune din punct de vedere al controlului tensionării fibrei la înfășurare, se propune o abordare asemănătoare celei implementată pentru reglarea poziției servomotorului dispozitivului de tensionare (v. subcap. 5.2.3). Identificarea teoretică a modelului matematic complet pentru acest sistem de înfășurare, este imposibil de realizat având în vedere complexitatea traiectoriilor de înfășurare și influențele perturbațiilor asupra sistemului (de ex. tensionarea indusă de subsistemul rolei de alimentare cu fibră). Astfel, se propune un sistem de reglare de tip Proportional-Integrator, pentru care, prin intermediul testelor experimentale, se identifică parametri optimi în vederea realizării de tensionări cu valori cât mai apropiate de cele impuse, determinate cu modele teoretice (v. subcap. 4.3).

Inițial, se consideră cunoscute valorile parametrilor: $R_m = 15$; $E_m = 20$ N. Aceștia sunt utilizați în dezvoltarea ecuației sistemului de reglare discret, unde $a_1 = -1$, b_0 și b_1 reprezintă factorii de discretizare conform transformatei Z^{-1} a unui sistem de reglare aplicând metoda seriilor de puteri. Se consideră de asemenea constante $P_e = 0,073$ s, perioada de eșantionare; $T_i = 10$ s, constanta de timp de integrare; $F_r = 14$ N. Totodată se consideră și relațiile de obținere a celorlalți parametri necesari,

$$b_1 = - \text{Amp}, \quad (7.6)$$

$$b_0 = \text{Amp} \left(\frac{P_e}{T_i} \right), \quad (7.7)$$

$$F_{eAi} = F_{ei-1}, \quad (7.8)$$

$$\text{PMPI} = -a_1 \text{PMPIA} + b_0 F_{ei} + b_1 F_{eAi}, \quad (7.9)$$

în care, PMPIA_i reprezintă Poziția Anterioară a Motorului în sistemul de reglare cu regulator de tip Proportional Integrator, F_{ei} - eroarea de forță măsurată în timp real, F_{eAi} - eroarea de forță anterioară ciclului curent de reglare.

Deoarece, valoarea factorului de amplificare, Amp, poate avea un efect considerabil asupra procesului de înfășurare în urma implementării regulatorului, se propune considerarea influenței acestuia prin implementarea a trei variante PMPIV1, PMPIV2 și PMPIV3 utilizând relațiile,

$$\text{Amp} = 2 \frac{R_m}{E_m}, \quad (7.10)$$

pentru varianta PMPIV1 și PMPIV2,

$$\text{Amp} = 10 \frac{R_m}{E_m}, \quad (7.11)$$

pentru varianta, PMPIV3. Valorile, 2 și 10, din aceste relații multiplică factorul de amplificare descris în sistemul (7.4).

Din analiza rezultatelor obținute în urma testelor experimentale, se poate observa că relația propusă (7.9) pentru sistemul de reglare de tip PI și valorile parametrilor propuși conform rel. (7.6), (7.7), (7.8), respectiv (7.11), au condus la obținerea unui efort măsurat, în apropierea celui de referință cu abaterile, $+0,5$ N și -1 N; în cazul variantei PMPIV3, pe tot parcursul traiectoriei, se evidențiază cea mai mică abatere, ± 0.5 N, valoarea medie a tensiunii măsurate fiind, $14,5$ N, foarte aproape de ținta propusă, 15 N.

În fig. 7.17, pentru a putea compara rezultatele obținute experimental, s-au sintetizat diverse variante de rezultate identificate ca fiind cele mai bune pentru fiecare din seturile de teste experimentale, la care s-au adăugat valoarea de referință a efortului impus (programat), prin intermediul interfeței cu utilizatorul, și graficul variației forței rezultate în urma realizării înfășurării fără tensionare.

Din analiza graficelor din fig. 7.17 se observă că rezultatele cele mai bune se obțin prin implementarea regulatorului de tip *Proportional-Integrator* care are la bază factorul de amplificare testat prin intermediul variantei de implementare PMPIV3.

Pornind de la rezultatele obținute în urma implementării algoritmului de reglare a

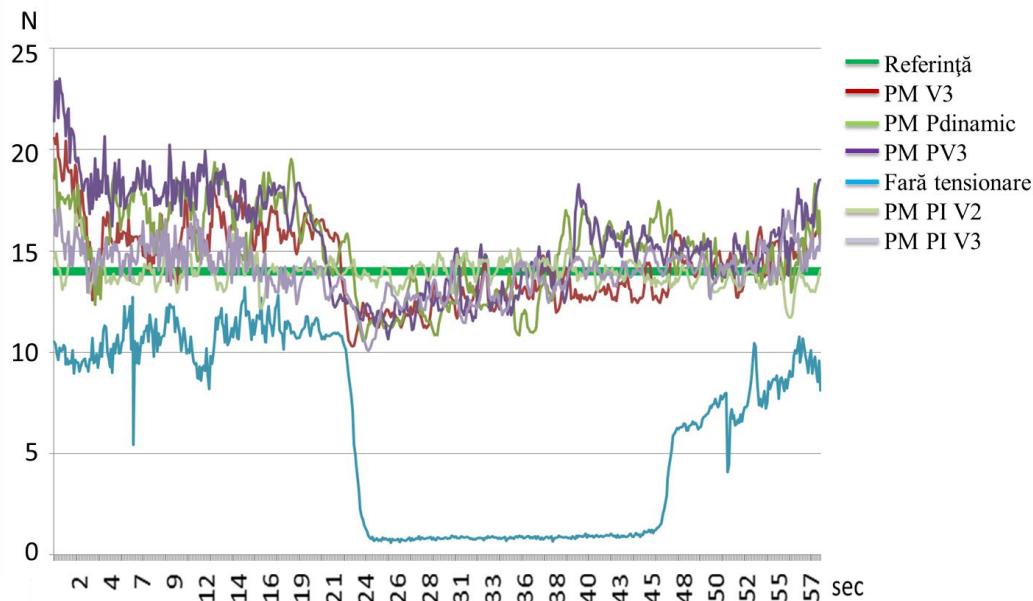


Fig. 7.17 Rezultatele experimentelor utilizând diferite soluții pentru parametrii modelului de reglare a tensionării fibrei de carbon

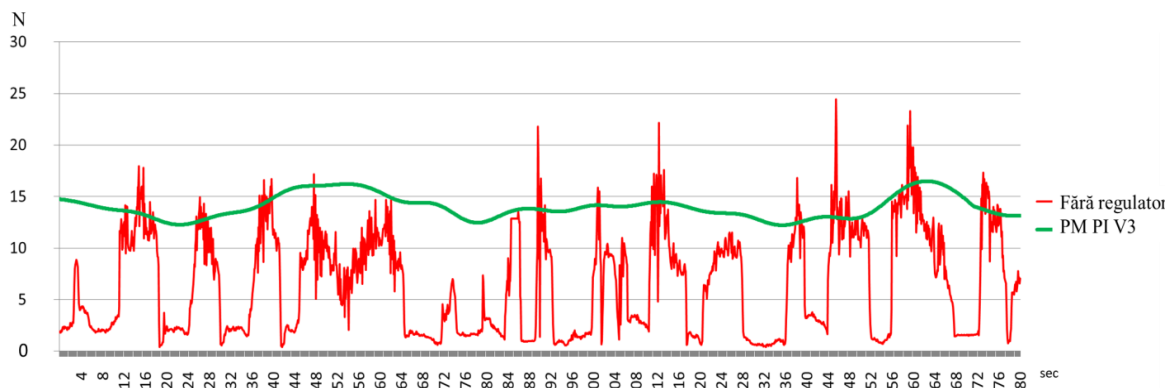


Fig. 7.18 Rezultatele testelor experimentale de înfășurare cu roboți colaborativi cu tensionare controlată cu regulator pentru traseul complet de așezare a fibrei în matriță

forței de tensionare a fibrei de carbon, pentru traiectoria de înfășurare cu o singură trecere prin fiecare punct, traiectoria a fost extinsă ulterior pentru întreaga lungime a traseului de depunere (în mai multe straturi) a fibrei de carbon în matriță, utilizând același algoritm, cu rezultatele pe întreaga traiectorie (fig. 7.18).

Acest sistem de înfășurare cu roboți colaborativi se adresează așadar marilor producători de structuri din materiale compozite care își doresc atât o producție de serie mare fără întreruperi și cu influență umană minimă dar și reducerea timpului necesar schimbărilor de reper la minim, având pregătit modelul noii matrițe, ajustarea tensionării realizându-se automat, limitările sistemului putând fi privite doar din perspectiva necesității în continuare de a realiza planificarea și generarea traiectoriei roboților în mediul virtual anterior implementării pe roboți, acțiune consumatoare de timp și de resurse umane înalt calificate. Totuși această limitare apare doar la implementarea unui nou tip de piesă.

7.4 STUDII EXPERIMENTALE DE ASAMBLARE ȘI MANIPULARE

SROC-ÎNF pentru realizarea structurilor din materiale compozite prin înfășurarea tensionată a fibrei într-o matriță suport, conceput, proiectat, dezvoltat, implementat și testat în cadrul studiilor din această teză de doctorat are flexibilitate mărită, și poate fi utilizat și pentru alte aplicații.

În continuare, se prezintă implementările SROC-ÎNF pentru operații de asamblare a subsistemelor mecanice care implică poziționări relative a elementelor componente și de manipulare a obiectelor rigide cu mase și/sau gabarite atipice (care nu pot fi manipulate de un singur robot). Astfel, cu scopul de a valida generalitatea SROC-ÎNF au fost realizate implementări specifice și studii experimentale de asamblare a două piese și de manipulare a unui obiect rigid atipic, de asemenea, cu doi roboți colaborativi supervizați de controlerul master.

7.4.1 PLANIFICAREA EXPERIMENTELOR DE ASAMBLARE CU ROBOȚI COLABORATIVI

Pentru studiul asamblării a două elemente mecanice, în literatura de specialitate s-a consacrat, aplicația bolț-alezaj (*peg in hole*) care, în continuare, va fi rezolvată prin personalizarea SROC-ÎNF [Sbanca, 2015b]. În fig. 7.19 se prezintă dimensiunile zonelor de asamblare ale bolțului (fig. 7.19,a) și alezajului (fig. 7.19,b). Pentru procesul de asamblare controlată se impune definirea riguroasă a zonelor în care se produce interacțiunea (coliziunea) inițială a celor două părți descrise prin teșituri și/sau racordări care în cazul unor forme și dimensiuni necorespunzătoare pot conduce la blocări ale procesului de asamblare robotizat.

Obiectivul principal al acestui studiu a fost de a modela și testa experimental posibilitățile de corecție controlată a traiectoriilor roboților în timpul introducerii bolțului în alezaj pornind de la controlerul master al SROC-ÎNF.

În cadrul studiilor experimentale s-au luat în considerare, pentru operația de inserare bolțului și

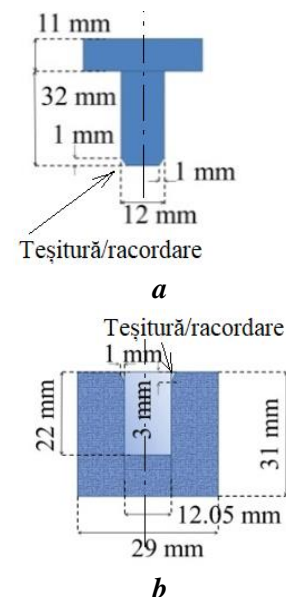


Fig. 7.19 Dimensiunile zonelor asamblate: **a** – bolțul, **b** – alezajul

alezajul din fig. 7.19 cu teșituri, 1x1 mm și respectiv 1x3 mm, și jocul (toleranța) arbore-alezaj 0,05 mm. Pentru asamblare un robot manipulează bolțul și celălalt piesa cu alezaj.

În figura 7.20 este prezentat procesul de asamblare, care este divizat în două faze. Prima presupune apropierea celor două elemente cu viteză mărită, până în proximitatea zonei de asamblare. Deplasările pieselor în cadrul acestei faze sunt supervizate de controlerile roboților. Pe baza pozițiilor celor doi roboți, controlerul master poate identifica o poziție aproximativă a celor două piese care trebuie asamblate. Faza a doua începe cu detecția primului contact (coliziuni) și presupune evaluarea contactului și adoptarea strategiei de deplasare pentru căutarea poziției de inserare, succesiune care este repetată până când sarcina de asamblare este realizată. Procesul de asamblare în faza a doua este supervizat complet de către cotrolerul master.

Pornind de la structura sistemului, pentru acest studiu a fost folosită metoda de reglare bazată pe relațiile de reglare tripozițional și bipozițional. Pentru reglarea poziției tripozițional pentru axele X, Y s-a folosit relația,

$$u(t) = \begin{cases} -u_m, & \text{pentru } \varepsilon < -\varepsilon_p, \\ 0, & \text{pentru } -\varepsilon_p < \varepsilon < +\varepsilon_p, \\ +u_m, & \text{pentru } \varepsilon > +\varepsilon_p, \end{cases} \quad (7.12)$$

în care, $u(t)$ reprezintă valoarea poziției robotului, raportat la sistemul de coordonate asociat prehensorului, u_m - valoarea de adăugat, calculată în controlerul master bazat pe valorile primite de la controlerul de forță, ε - valoarea curentă a forței și ε_p - valoarea limită a forței de contact impusă, introdusă prin intermediul interfeței utilizator (valoarea acestei limite poate fi diferită pentru axele X și Y).

Deoarece, direcția pe care se deplasează robotul pentru a introduce bolțul în alezaj este axa Z, relația de reglare este bipozițional,

$$u(t) = \begin{cases} +u_m, & \text{pentru } \varepsilon < \varepsilon_p, \mu < \mu_p \text{ și } \rho < \rho_p, \\ 0, & \text{pentru } \varepsilon > \varepsilon_p, \mu > \mu_p \text{ sau } \rho > \rho_p, \end{cases} \quad (7.13)$$

în care, ε reprezintă valoarea curentă a forței pe axa Z, ε_p - valoarea limită a forței de contact impusă pentru axa Z, μ - valoarea curentă a forței pe axa X, μ_p - valoarea limită a forței de contact impusă pentru axa X și ρ - valoarea curentă a forței pe axa Y, ρ_p - valoarea limită a forței de contact impusă pentru axa Y, μ și ρ fiind condiții de siguranță pentru deplasarea pe axa Z, fiind necesară corectarea forțelor pe axele X și Y înainte de a continua deplasarea pe axa Z.

7.4.2 REALIZAREA EXPERIMENTELOR ȘI ACHIZIȚIA DE DATE

Prin intermediul testelor experimentale de asamblare cu roboți ABB colaborativi se urmărește remodelarea și implementarea sistemului de conducere al SROC-ÎNF pentru aplicația bolț-alezaj.

Piesa cu alezaj este manipulată de robotul ABB IRB 2400 prin intermediul unui prehensor cu două bacuri paralele (cu contacte în patru puncte), iar bolțul ,apucat cu un

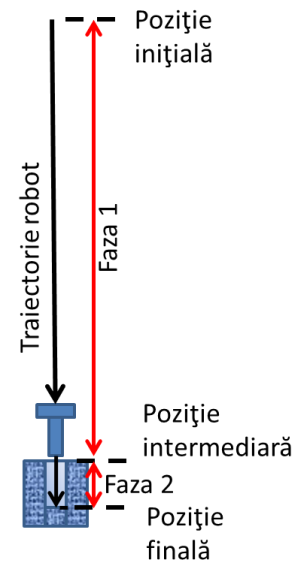


Fig. 7.20 Fazele procesului de introducere a bolțului în alezaj

prehensor cu trei bacuri (cu centrare axială), este manipulat de robotul ABB IRB 1600 (fig. 7.22). Poziționarea pieselor de asamblat în prehensoare s-a făcut prin rezemarea acestora pe suprafețe de referință.

Poziția celor două obiecte supuse procesului de asamblare se cunoaște în termeni aproximativi pe baza suprafețelor de referință care ajută la o poziționare inițială a celor doi roboți în faza de preasamblare (fig. 7.20), aceasta nefiind suficient de precisă pentru a putea realiza întregul proces de asamblare. În acest caz, se utilizează sistemul de verificare a forțelor de contact, care are o frecvență de achiziție a valorilor forțelor de 20 Hz - impusă de controlerul master - pentru a avea timp de a procesa și trimite noile valori către controlerul roboților.



Fig. 7.22 Procesul de asamblare bolț-alezaj cu doi roboți

7.4.3 PRELUCRAREA ȘI ANALIZA REZULTATELOR EXPERIMENTELOR DE ASAMBLARE

În cadrul primului test, incrementul de poziționare, u_m , a TCP-urilor prehensoarelor a fost setat la 1 mm, adică la fiecare depășire a limitelor forței de contact pe o direcție se impune adăugarea de 1 mm în direcția opusă pentru a diminua forța curentă din contact. Astfel, au fost înregistrate continuu ambele mărimi, forță și poziție, pentru a putea evidenția influența uneia asupra celeilalte.

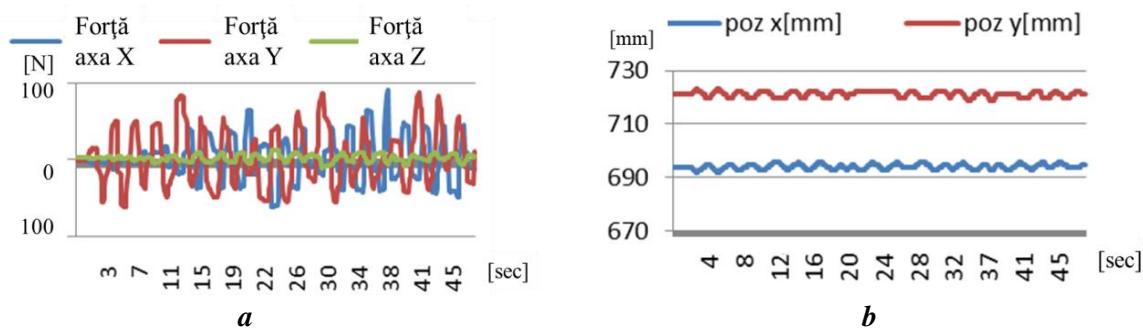


Fig. 7.23 Valorile parametrilor controlați (testul 1): **a** - forțele de contact, **b** - pozițiile în timpul asamblării

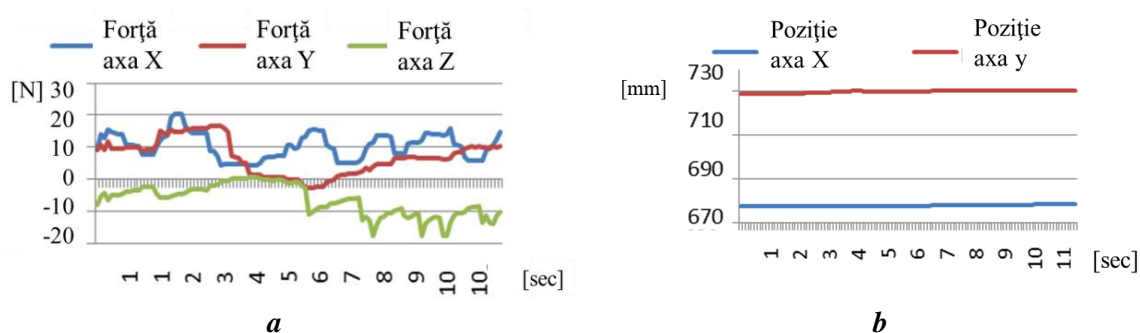


Fig. 7.25 Valorile parametrilor controlați (testul 3): **a** - forțele de contact, **b** - pozițiile în timpul asamblării

Analizând rezultatele din fig. 7.23, se observă oscilații mari de poziționare pe direcțiile X și Y raportate la sistemul de coordonate a bazei robotului care susține bolțul. Aceste rezultate se obțin utilizând sistemele de reglare a forțelor de contact implementate în controlerul master. Oscilațiile forțelor evidențiate în fig. 7.23,a, au valori între ± 100 N. Valoarea limită a forței de contact, 25 N, a fost introdusă în interfața utilizatorului a controlerului master.

În cel de al doilea test valorile limită pentru poziționarea robotului pentru fiecare dintre axe au fost setate la minimul acceptat, 0,1 mm. În continuare, pentru îmbunătățirea performanțelor procesului de asamblare s-a realizat al treilea test cu valori limită ale forței de contact ajustate la valoarea de 35 N. În fig. 7.25 se observă oscilații mult reduse ale amplitudinii forței pe cele două axe X și Y, deplasarea după axa Z, către punctul final fiind mult mai rapidă. În acest caz, se observă, pe de-o parte, oscilații de poziționare mai mici (± 1 mm) - comparativ cu testul anterior în care oscilațiile de poziție pe ambele axe sunt cuprinse între ± 2 mm - și că frecvența oscilațiilor forțelor este redusă, deși amplitudinile oscilațiilor forțelor sunt în ambele cazuri în intervalul, ± 15 N, și, pe de altă parte, durata ciclului mult redusă, la 30% din durata celui din testul anterior.

În urma testelor realizate s-au identificat parametri nominali pentru procesul de asamblare bolț-alezaj cu ajutorul a doi roboți industriali pe baza returului de forță provenit de la un senzor de forță montat pe un robot. Totodată s-a putut valida și dependența forță-poziție, necesară corecției traiectoriilor roboților în procesul de asamblare.

Noutățile aduse de acest studiu sunt focusate pe algoritmi de colaborare a roboților cu scopul de a îndeplini sarcini de asamblare de precizie în perioade de timp reduse. În plus, totodată se evidențiază ca noutate și interfețele utilizator dedicate proceselor de asamblare cu flexibilitate mărită.

7.4.4 MANIPULAREA OBIECTELOR ATIPICE CU DOI ROBOȚI COLABORATIVI

Când un obiect aflat în procesare este prea mare sau prea greu (atipic), pentru a fi manipulat de un singur robot, se pot folosi doi roboți integrați într-un sistem colaborativ. Metoda de colaborare adecvată pentru acest tip de proces presupune dezvoltarea unui sistem *master-slave* de supervizare a celor doi roboți. Astfel, un robot considerat conducător (master) deplasează prehensorul după o traiectorie impusă, iar robotul condus (slave) urmărește mișcările robotului master bazat pe date, despre forțele impuse de modelul de manipulare, măsurate de un senzor de forță.

Obiectivul principal propus pentru acest studiu este ca pe baza returului de forță primit de la senzorul de forță, robotul slave să se deplaseze pe o traiectorie conform modelului de manipulare propus.

Pentru deplasarea robotului slave, corelat cu deplasarea robotului master, trebuie să se țină cont de greutatea și poziția centrului de greutate ale obiectului manipulat, astfel încât acesta să rămână pe tot parcursul manipulării cu aceeași orientare, orizontal în acest caz [Sbanca, 2014b].

În fig. 7.28 se prezintă robotul master (RM) care se deplasează pe traiectoria predefinită (T_m) și robotul slave (RS) cu deplasare pe traiectoria (T_s), generată pe baza forței G_s , măsurată cu senzorul de forță (S). Această forță, preluată de prehensorul robotului slave, se determină teoretic cu relația,

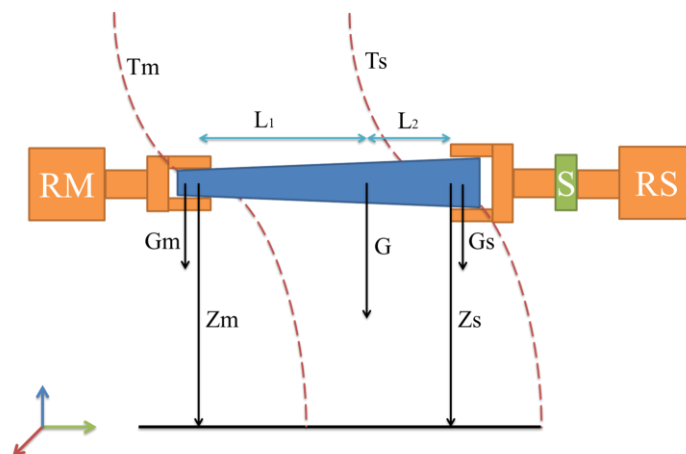


Fig. 7.28 Modelul manipulării unui obiect rigid cu ajutorul a doi roboți colaborativi

$$G_s = G \frac{L_1}{L_1 + L_2}, \quad (7.14)$$

în care, G reprezintă greutatea obiectului de manipulat, $L_{1,2}$ – distanțele centrului de greutate al obiectului de punctele de prindere (capetele) ale acestuia. Similar, se determină și forța preluată de prehsorul robotului master,

$$G_m = G \frac{L_2}{L_1 + L_2}, \quad (7.15)$$

utilă pentru alegerea prehsorului și robotului master. Pentru controlul pozițiilor robotului slave se consideră, cotele $Z_s = Z_m$. Forța impusă pentru controlul robotului slave F_s este egală cu G_s care se calculează cu rel. (7.15). Aceasta este considerată ca fiind o constantă care în cazul deplasării pe axa Z nu influențează noua poziție impusă robotului slave.

7.5 CONCLUZII

Testele experimentale, în primă etapă realizate cu un robot, pentru verificarea metodelor și modelelor de înfășurare a fibrei, au avut ca obiectiv, cu precădere, de a analiza influența forțelor de frecare induse de sistemul de alimentare și de impregnare, asupra procesului de tensionare, pe de-o parte, și, pe de altă parte, de a verifica valorile nominale ale efortului de tensionare. Au fost realizate sesiuni de teste de înfășurare a fibrei, utilizând diferite tipuri de setări pentru a observa comportări posibile și pentru a stabili configurația nominală pentru procesul automat de înfășurare.

Testele experimentale de tensionare controlată a fibrei de carbon realizate în a doua etapă, au implicat implementarea unor sisteme de reglare, utilizând ca intrare valoarea efortului din fir măsurată cu un senzor integrat în unul din roboți, iar ca ieșire poziția motorului de tensionare al unui dispozitiv integrat în capul de înfășurare.

În urma testelor experimentale descrise în acest capitol și a rezultatelor obținute, se arată că sistemul integrat cu roboți colaborativi, împreună cu subsistemul de tensionare a fibrei, coordonat de controlerul master, poate să fie utilizat pentru realizarea unui proces de înfășurare automat, fără intervenția factorului uman, care asigură o înfășurare conform cerințelor de produs impuse în proiectul structurii compozite.

În finalul acestui capitol, sunt descrise două aplicații care pot fi realizate prin intermediul aceluiași sistem cu roboți colaborativi, o aplicație de asamblare, de tipul bolț-alezaj, și o aplicație de manipulare cu doi roboți a unui obiect rigid atipic.

8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PROPRII, VALORIFICAREA REZULTATELOR ȘI NOI DIRECȚII DE CERCETARE

8.1. CONCLUZII FINALE

Întrebarea principală la care prezenta lucrare răspunde este: *Cum se poate îmbunătăți procesul tehnologic de obținere prin înfășurare a structurilor din materiale compozite, cu precădere, folosind roboți industriali colaborativi ?* Ca prim răspuns la această întrebare a fost formulat obiectivul principal: *Studiul, concepția, proiectarea, dezvoltarea, implementarea și testarea unui sistem cu doi roboți colaboratori prin intermediul căruia să se realizeze operații tehnologice de înfășurare cu tensionare a fibrelor de carbon în matrițe suport pentru obținerea de structuri din materiale compozite* și obiectivele specifice: analiza bibliografică exhaustivă asupra cercetărilor teoretice și experimentale în domeniile tehnologiilor de obținere a structurilor din materiale compozite și a roboților industriali adaptabili pentru procesele tehnologice de înfășurare a fibrei de carbon; modelarea, algoritimizarea și programarea procesului de înfășurare a fibrei de carbon prin planificarea, generarea, simularea și implementarea traiectoriilor roboților participanți; modelarea, algoritimizarea și programarea procesului de tensionare a fibrei de carbon la înfășurarea acesteia pe trasee complexe (3D) din matrițe suport; concepția, proiectarea, dezvoltarea, simularea și testarea unui dispozitiv de tensionare a fibrei cu un subsistem de control propriu care poate fi integrat în sistemul automat; concepția, proiectarea, dezvoltarea, implementarea, simularea și testarea unui sistem de control și comandă ierarhizat care implementează algoritmi de funcționare și reglare a subsistemelor (inclusiv a roboților) folosind algoritmi de comunicații specifici acestora; studii experimentale cu sistemul integrat în vederea validării funcționalității, atingerii performanțelor de proces, precum și a generalității acestuia prin personalizări pentru aplicații alternative.

Tehnologiile actuale și producătorii din domeniile auto și aeronautică provoacă toți producătorii de subansamble spre a se orienta către tehnologii noi de înfășurare a fibrei de carbon pentru obținerea structurilor din materiale compozite.

Tehnologiile actuale, de obicei, cu înfășurarea fibrei, manual sau cel mult semiautomat, nu permit producției în cantități mari și de calitate. Produsele unicat sau în serii mici, obținute prin înfășurarea fibrei de carbon cu tehnologii rigide, au performanțe de rezistență și rigiditate reduse.

Una din direcțiile de diminuare a acestor dezavantaje este robotizarea proceselor de înfășurare și de tensionare a fibrei de carbon pentru dezvoltarea de tehnologii flexibile de obținere a structurilor compozite complexe.

În urma analizei în cadrul stadiului actual a cercetărilor teoretice și experimentale în domeniul *structurilor din materiale compozite* se detaliază structura generală a unui sistem de înfășurare clasic care cuprinde rola de alimentare cu fibră, baia de impregnare cu rășină, în cazul metodei de înfășurare umedă, și dispozitivul de tensionare a fibrei, dacă este cazul. Implementarea dispozitivului de tensionare se poate realiza în trei variante: cu role întinzătoare, cu frânare la alimentare sau prin frânare la înfășurare.

Din analiza activităților tehnologice executate de roboți în mediile industriale, dar și din tendințele actuale din robotica industrială, rezultă necesitatea dezvoltării de cercetări privind dezvoltarea unei platforme care să integreze o gamă cât mai largă de funcționalități. În cazul acestei teze de doctorat, pentru a putea dezvolta un sistem flexibil în funcție de condițiile impuse de mediile tehnologice de obținere a structurilor prin înfășurarea fibrei, sunt analizați roboții industriali universali care prezintă posibilități de control cu interacțiune în

forță; strategiile de control cu interacțiune în forță sunt grupate în două categorii: control în forță indirect și control în forță direct.

Având în vedere diversitatea structurilor compozite dezvoltate în practică, pentru studiile din cadrul acestei teze de doctorat s-a considerat ca fiind reprezentativă structura suport coloană de direcție, inițial executată din oțel care, ca urmare a studiilor din cadrul tezei de doctorat *Performanțele fizico-mecanice ale pieselor din materiale compozite utilizate pentru coloana de direcție a autovehiculului*, elaborată de dr. ing. Thomas Heitz, a fost concepută și dezvoltată ca o structură compozită pe bază de fibră de carbon înfășurată. Pentru realizarea acestei structuri s-a identificat modelul geometric care a stat la baza procesului tehnologic dezvoltat. Astfel, s-a luat în considerare modelarea procesului de înfășurare a fibrei de carbon cu ajutorul roboților industriali.

Pentru a răspunde obiectivelor propuse s-a conceput un *sistem cu doi roboți industriali*, unul de înfășurare cu tensionare a fibrei și altul pentru manipularea matriței suport, supervizat de un sistem de control și comandă superior.

Planificarea și generarea traiectoriilor roboților au fost realizate, preliminar, în cadrul mediului virtual dezvoltat folosind pachetul dedicat RobotStudio respectând restricțiile impuse de proces și cele rezultate din modelele matematice.

Pentru *controlul efortului* (forței interne) din fibra de carbon în timpul procesului de înfășurare în canale ale matriței suport, s-a implementat un sistem de control în buclă închisă pentru a putea obține în timp real un semnal de răspuns asupra valorii efortului programat, care se corelează cu sistemul de control a procesului de înfășurare.

Subsistemul de măsurare a efortului din fibră a fost completat cu un subsistem de tensionare, bazat pe un servomotor electric, care acționează din lateral asupra fibrei provocând rezistențe (frecări) variabile la trecerea acesteia printr-un orificiu din capul de înfășurare. Dispozitivul de tensionare a fost și obiectul unei cereri de brevet, depusă și acceptată la OSIM, în care se revendică *proiectarea și dezvoltarea soluției constructive propusă pentru tensionarea controlată a unei fibre de carbon în procesul de înfășurare robotizat*.

Sistemul de reglare a tensionării fibrei se bazează pe modelul matematic al procesului de înfășurare care generează valori ale efortului din fibră în toate punctele traiectoriei de înfășurare și sunt impuse ca date de referință. Urmărind comparativ procesul de reglare pentru diverse situații funcționale s-au conceput și dezvoltat două variante de sisteme de reglare, unul bazat pe un element proporțional (P) și celălalt care adaugă, în plus, un element derivativ și o întârziere de ordinul întâi (PDT1). Sistemul de reglare a acționării servomotorului dispozitivului de tensionare și a algoritmului proiectat, au fost testate și în mediul virtual de simulare, utilizând pachetele Matlab și Simulink.

În urma identificării și stabilirii detaliilor privind subsistemele componente principale, roboți ABB, cap de înfășurare, dispozitiv de tensionare, s-a conceput, dezvoltat și implementat un Sistem integrat cu ROboți Colaborativi pentru procesul de ÎNFășurare (SROC-ÎNF) a fibrei cu tensionare controlată.

Controlul și comanda acestui sistem se fac ierarhizat fiind supervizat în fiecare moment la nivel superior de către controlerul master prin intermediul unor algoritmi de conducere și protocoale de comunicații specifice subsistemelor inferioare.

În dezvoltarea sistemului, SROC-ÎNF, s-au utilizat diferite medii de programare și simulare pentru a implementa algoritmi de calcul, de control, de comandă și de conexiune a diferitelor componente hardware. Pentru programarea roboților și simularea urmării traiectoriilor s-a utilizat platforma RAPID prin intermediul pachetului Robot Studio. În plus, s-a utilizat mediul de programare C#, în special, pachetul PC SDK-ul pentru dezvoltarea ca o platformă de tip SCADA a controlerului master. Interfața de comunicare cu subsistemul de control PCI care face achiziția și prelucrarea datelor de la senzorul de forță a fost implementată ca o aplicație distinctă în Visual Basic. Pentru programarea microcontrolerului utilizat pentru controlul motorului de tensionare s-a utilizat mediul de programare furnizat de

Arduino. Prin intermediul acestuia s-a implementat algoritmul de reglare a poziției țintă a servomotorului de tensionare dependent de efortul impus și algoritmul de recepție și transmitere a rezultatelor către platforma master.

În urma proceselor de implementare și testare individuală a componentelor principale (roboți ABB, cap de înfășurare, dispozitiv de tensionare), conform schemei V (v. subcap 1.4), s-a conceput programul studiilor experimentale cu sistemul SROC-ÎNF.

În primă fază, pentru a determina valorile nominale ale efortului din fibră, s-au făcut teste experimentale de analiză a influențelor forțelor de frecare din subsistemul de alimentare și impregnare cu rășină, asupra procesului de înfășurare cu tensionare.

Testele experimentale efectuate cu SROC-ÎNF au stat la baza identificării parametrilor nominali ai procesului de înfășurare. În urma repetării procesului de înfășurare a fibrei de carbon, în condiții identice, dar cu setări diferite ale sistemelor de reglare a tensionării, rezultatele cele mai bune se obțin cu regulatorul Proporțional-Integrator îmbunătățit, care pe tot parcursul traiectoriei, asigură cea mai mică abatere, ± 0.5 N, valoarea medie a efortului măsurat fiind de 14,75 N, foarte aproape de ținta propusă, 15 N.

În urma testelor experimentale efectuate și a rezultatelor obținute, se arată că SROC-ÎNF poate realiza înfășurări ale fibrei cu tensionare variabilă în matrițe cu configurații complexe (3D) ale traseelor de înfășurare, coordonat de controlerul master, fără intervenția factorului uman, pentru a obține structuri compacte ale pachetului de fibră tensionată constant, conform cerințelor de produs.

În vederea evidențierii generalității SROC-ÎNF s-au conceput două aplicații suplimentare care au implicat implementarea colaborării roboților precum și a subsistemului de control și comandă cu retur de forță. În finalul capitoului șapte sunt descrise implementările SROC-ÎNF pentru procesele de asamblare bolț-alezaj și de manipulare a obiectelor rigide atipice. Rezultatele obținute, ca și în cazurile anterioare, confirmă funcționalitatea și robustețea sistemului.

8.2. CONTRIBUȚII PROPRII

Prezenta teză de doctorat are un profund caracter inovativ, autorul aducând o serie de contribuții originale privind conceperea, implementarea și testarea unui sistem de colaborare a roboților industriali și a unor dispozitive de înfășurare cu tensionare a fibrei de carbon pentru obținerea structurilor compozite. Pornind de la metodologia de cercetare propusă în capitolul unu, urmărind acoperirea obiectivelor propuse, în urma cercetărilor efectuate, precum și a rezultatelor obținute, se sintetizează următoarele contribuții proprii:

1. Analiza stadiului actual al cercetărilor și realizărilor în domeniile tehnologiilor de obținere a structurilor din materiale compozite, cu precădere, prin înfășurarea fibrei de carbon, și a roboților industriali privind posibilitățile de implementare a acestora în sisteme tehnologice avansate.
2. Modelele de obținere a traiectoriilor procesului de înfășurare robotizată a fibrei de carbon prin planificarea, generarea, simularea și implementarea acestora în medii virtuale, pe baza modelelor matematice identificate.
3. Modelul matematic și algoritmul de determinare a efortului din fibră la înfășurarea cu un robot urmărind o traiectorie impusă pentru a obține structuri cu rezistențe și rigidități mărite.
4. Concepția, dezvoltarea și implementarea unui dispozitiv de tensionare a fibrei, integrat în capul de înfășurare, cu sistem de control și comandă bazat pe modelul matematic al procesului de tensionare.
5. Concepția, dezvoltarea și implementarea unui sistem integrat cu doi roboți colaborativi unul pentru înfășurarea fibrei de carbon și celălalt pentru manipularea matriței suport.

6. Concepția și implementarea unor algoritmi și subprogram de reglare a tensionării fibrei de carbon, utilizând senzorul de forță JR3 și dispozitivul de tensionare a fibrei fixate pe flanșa robotului de înfășurare.
7. Sistemul de comandă și control ierarhizat, supervizat de un controler master, împreună cu algoritmi și programe dezvoltate pentru fiecare dintre subsistemele de control a urmării traiectoriei roboților, de generare a tensionării și de comunicație, între controlerul master și roboți, respectiv de comunicație cu și între celelalte subsisteme componente.
8. Algoritmi și programe de reglare pentru sistemele de comandă și control a proceselor de măsurare a forței și de tensionare a fibrei.
9. Metodologii și programe de experimentare, pe de-o parte, pentru evaluarea și validarea performanțelor subsistemelor și sistemului integrat de înfășurare și tensionare a fibrei de carbon și, pe de altă parte, pentru optimizarea parametrilor funcționali ai sistemelor de reglare a proceselor de înfășurare și tensionare.
10. Concepția, modelarea și dezvoltarea de aplicații alternative, de asamblare bolț-alezaj și de manipulare obiecte rigide atipice, cu sistemul SROC-ÎNF pentru evidențierea flexibilității și generalității acestuia.

8.3. VALORIFICAREA REZULTATELOR CERCETĂRII

8.3.1. LUCRĂRI PUBLICATE

În perioada de realizare a prezentei teze de doctorat, autorul a elaborat șase lucrări științifice, la care este prim autor, publicate în buletine de conferințe (primele 3 cu proceedings ISI):

1. **Sbanca M.P.**, Mogan G.L., *Cooperative Assembly Using Two Industrial Robots*, Proceedings of the 24th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD), pag. 47-57, 2015.
2. **Sbanca M.P.**, Mogan G.L., *Tensioned carbon fiber winding on a collaborative robots cell. Part 1 (system)*, New Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science, vol. 57, pag. 437-444, Springer, 2018.
3. **Sbanca M.P.**, Mogan G.L., *Tensioned carbon fiber winding on a collaborative robots cell. Part 2 (tests)*”, New Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science, vol. 57, pag. 445-453, Springer, 2018.
4. **Sbanca M.P.**, Mogan G.L., *Cooperation of Two Industrial Robots for Manipulation Rigid Objects Using SCADA System*, Applied Mechanics and Materials, vol. 555, pag. 312-319, 2014.
5. **Sbanca, M.P.** *Trajectory Planning for Winding Carbon Wire of Composite Structures Using Cooperative Robots*, Applied Mechanics and Materials, vol. 656, pag. 280-287, 2014.
6. **Sbanca, M.P.**, Mogan, G.L. *Winding of Carbon Wire Composite Structures Using Two Cooperative Industrial Robots*”, Applied Mechanics and Materials, vol. 762, pag. 291-298, 2015.

și un brevet de invenție,

1. **Sbanca, M. P.**, Mogan, G. L., *Dispozitiv pentru tensionare automată a unui fir*, Rezumat brevet nr. RO 132817 A0 2018, Universitatea Transilvania din Brașov, 2018.

8.3.2. PARTICIPĂRI LA CONFERINȚE

În perioada elaborării tezei de doctorat, autorul a prezentat lucrări științifice în cadrul următoarelor conferințe:

1. The IACSIT/SCIEI/UASTRO International Conference on Optimization of the Smart systems and their Application in Aerospace, Robotics, Mechanical Engineering, Manufacturing Systems, Biomechanics, Neurorehabilitation and Human Motricities, ICMERA 2014, 24-27 October 2014, Bucharest, Romania.
2. The 9th edition of the International Conference on Modelling and Optimization of the Aerospace, Robotics, Mechanical Engineering, Manufacturing Systems, Biomechanics, Neurorehabilitation and Human Motricities fields OPTIROB 2014, 26-29 June 2014, President Hotel, Mangalia, Romania.
3. The 24th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD, May 27-29, 2015, University Politehnica of Bucharest, Romania
4. ROBOTICS 2014 - The International Conference on ROBOTICS, October 23-24, 2014, Bucharest, Romania.
5. The 12th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines SYROM'2017, November 02-03, 2017, Iași, Romania.

În perioada studiilor doctorale autorul a participat ca membru în cadrul contractelor de cercetare:

1. 7558/29.05.2012 Activități de cercetare în vederea stabilirii proprietăților coloanei de direcție a automobilului

8.4. DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

Cercetările realizate, precum și rezultatele teoretice, experimentale și practice obținute, integrate într-o structură tehnologică de obținere a structurilor din materiale compozite, acoperă doar parțial diversitatea problemelor evidențiate în urma stadiului actual. Din analiza studiilor realizate, precum și a rezultatelor obținute în cadrul acestei lucrări, se evidențiază trei direcții principale de continuare a acestora:

- Studii avansate în domeniul colaborării roboților industriali ca structuri robot-robot și/sau robot-robot-operator uman, inteligente, pentru a face mai facile și mai flexibile interacțiunile între roboți și operatorul uman în timpul proceselor tehnologice.
- Planificarea automată și cognitivă a traiectoriilor roboților industriali colaborativi, astfel încât roboții să se deplaseze cât mai rapid posibil în procesul de înfășurare a fibrei în matrițe suport, indiferent de complexitatea acestora.
- Studii privind dispozitivele de tensionare pentru stabilizarea poziționării acestora cât mai bună, în jurul valorilor nominale impuse de modelul teoretic și, pentru optimizarea structurii constructive a acestora.

BIBLIOGRAFIE

1. [Abdallah, 2010] Abdallah M. G., „Carbon Fiber technology center”, UT-Battelle LLC, 2010
2. [Afonso, 2007] Afonso G., Pires J. N. și Estrela N., “Force control experiments for industrial applications: a test case using an industrial deburring example”, *Assembly Automation*, Emerald Group Publishing Limited, vol. 27 (2), pag. 148 – 156, 2007
3. [Aized, 2011] Aized T. și Shirinzadeh B., „Robotic fiber placement process analysis and optimization using response surface method”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 55. 393-404, 2011
4. [Akella, 1999] Akella P., Peshkin M., Colgate E., Wannasuphprasit W., Nagesh N., Wells J., Holland S., Pearson T. Și Peacock B., „Cobots for the automobile assembly line”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation 1999*, Detroit, 1999
5. [Akkus, 2008] Akkus N., Genc G. și Girgin C., „Control of the pretension in filament winding process”, *Actamechanica et automatic*, Vol. 2, 2008
6. [Aron, 2009] Aron T. V. C., „Contribuții privind optimizarea constructivă și funcțională a modulelor cu acționare electrică din structura roboților industriali”, *Rezumatul tezei de doctorat*, Universitatea din Oradea Facultatea de Inginerie Electrică și Tehnologia Informației, Oradea, 2009
7. [Arteaga, 2006] Arteaga M. A., Martinez-Rosas J. C. și Castillo-Sanchz A. M., „Decentralized control of cooperative robots without velocity–force measurements”, *Automatica* Volume 42, Issue 2, Pages 329-336, 2006
8. [Asad, 2010] Asad M., Raza A., Farooq U., Ishaq M. și Ahmad B., „Design and development of microcontroller based autonomous peg placement robot”, *IEEE ICCSIT*, pag. 486 – 490, 2010
9. [Ata, 2007] Ata A., „Optimal trajectory planning of manipulators: a review”, *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2, No. 1, pag. 32-54, 2007
10. [Balasubramanian, 2011] Balasubramanian E., Ahammed S. R., “Adaptive control for two collaborative robots handling an object without velocity feedback”, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 3 No. 8 August, 2011
11. [Blanco, 2015] B. M. J., „Adaptation and study of a filament winding machine for in-situ consolidation of thermoplastic composites”, *Master Thesis No. 15-048*, Institute of design materials and fabrication Laboratory of composite materials and adaptive structure, 2015
12. [Bottazzi, 2006] Bottazzi V., Fonseca J., “Off-line Programming Industrial Robots Based in the Information Extracted From Neutral Files Generated by the Commercial CAD Tools”, *Pro Literatur Verlag*, 2006
13. [Bozma, 2012] Bozma H. și Kalahoglu M.E., “Multirobot coordination in pick-and-place tasks on a moving conveyor”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28, pag. 530–538, 2012
14. [Brayton, 2009] Brayton, C., Santos T., Shijo G., Sandy A. și Weimann D., ”Composite filament winding machine”, *Multi-Disciplinary Senior Design Conference Kate Gleason College of Engineering Rochester Institute of Technology Rochester*, 2009
15. [Bruyninckx, 1995] Bruyninckx H., Dutre S. și De Schutter J., “Peg-on-Hole: A Model Based Solution to Peg and Hole Alignment”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995
16. [Bruzzone, 2002] Bruzzone L., Molfino R. și Zoppi M., „Modelling and control of Peg-in-Hole assembly performed by a translational robot”, *IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control*, 2002
17. [Bubeck, 1988] Bubeck K., *U.S. Patent 4,750,960*, 1988
18. [Buckley, 1973] Buckley D., “Friction, wear, and transfer of carbon and graphite to copper, chromium and aluminium metal surfaces in vacuum”, National Aeronautics and space administration, Washington D.C, 1973

19. [Bundy, 2005] Bundy B.C., "Use of pultruded carbon fiber/epoxy inserts as reinforcement in composite structures", *A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering*, Montana State University, Bozeman, Montana 2005
20. [Callegari, 2003] Callegari M., Suardi A., „On the force-controlled assembly operations of a new parallel kinematics manipulator”, *Proc. Mediterranean Conf. on Control and Automation*, pag 18-20, 2003
21. [Chabal, 2005] Chabal C., Megard C. și Sibille L., "EMM-3D : a Virtual Environment for Evaluating Maintainability from CAD Models", Laval Virtual 2005 France - Laval - 20-24 april, 2005
22. [Chhatpar, 2001] Chhatpar S. și Branicky M., „Search Strategies for Peg-in-Hole Assemblies with Position Uncertainty”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pag. 1465 - 1470 vol.3, 2001
23. [Comnac, 2008] Comnac V., "Teoria Sistemelor", Facultatea de Automatică și Informatică Aplicată, Universitatea "Transilvania", Brașov, 2008
24. [Debus, 2004] Debus T., Dupont P. și Howe R., „Contact State Estimation using Multiple Model Estimation and Hidden Markov Models”. *Int. J. Robot*, pag. 399-413, 2004
25. [Dietrich, 2012] Dietrich F., Lochte C., Jeschke S. și Raatz A., „An agent-based concept for planning and control of the production of carbon fiber reinforced plastics aircraft structures with mobile production units”, *German Academic Society for Production Engineering*, 2012
26. [Duguleana, 2011] Duguleana M., "Învățarea roboților mobili pentru deplasare și manipulare în medii industriale", Universitatea Transilvania Brasov, 2011
27. [Falco, 2016] Falco J., Marvel J., Norcross. Și Wyk K. V., "Benchmarking Robot Force Control Capabilities: Experimental Results", *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) – 8097*, 2016
28. [Franke, 2013] Franke J., Dobroschke A., "Robot-based winding process for flexible coil production", *Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg*, 2013
29. [Galabov, 2013] Galabov V., Slavkov V., Slavov G. și Savchev S., "Mechatronic Approaches for Functional Structural Synthesis of Mechanical Systems of Industrial Robots", *Cybernetics and information technologies*, Volume 13, No 4, 2013
30. [Gale, 2012] Gale S. și Harry N. E., „Clean filament winding: process optimization”, *The University of Birmingham for the degree of doctor of philosophy*, 2012
31. [Gan, 2015] Gan D., Dias J. și Seneviratne L., "Singularity-Free Workspace Aimed Optimal Design of a 2T2R Parallel Mechanism for Automated Fiber Placement", *Transactions of the ASME:Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(4), pag. 1-9, 2015
32. [Garcia, 2005] Garcia J. G., Robertsson A., Ortega J. G. și Johansson R., "Self Calibrating Procedure for a 3D Force Observer", *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, Seville, Spain, December 12-15, 2005
33. [Geiger, 2017] Geiger R. și Pahl J., "Carbon Composite Manufacturing in Automotive Volume Production", *lightweight.design*, 2017
34. [Gîrbacia, 2011] Gîrbacia F., Duguleană M. și Stavăr A., "Off-line programming of industrial robots using co-located environments", *Advanced Materials Research*, vol. 463-464, pag. 1654-1657, 2011
35. [Haage, 2010] Haage M., "On the Programming and System Integration of Robots in Flexible Manufacturing", Faculty of Engineering, LTH at Lund University, Computer Science, 2010
36. [Heitz, 2013] Heitz T., "Performantele fizico-mecanica ale pieselor din material composite utilizate pentru coloana de directive a autovehiculelor", *PhDr thesis*, Mechanical Engineering Faculty, Transilvania University Brasov, 2013
37. [Hongya, 2007] Hongya F., Xianfeng W., Zhenyu H. și Yunzhong F., "Abnormal Shape Mould Winding", *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 20, pag. 552-558, 2007

38. [Ionescu, 2008] Ionescu M. și Hatton B., “Off-line programming in virtual reality of industrial robots for cooperative applications”, *Conference: 3rd International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering - ACME 2008, Volume: Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi, Technical University "Gh. Asachi"*, Section Machine Design, 2008
39. [Jia, 2011] Jia M. și Yang G., “Research of Optical Fiber Coil Winding Model Based on Large-deformation Theory of Elasticity and Its Application”, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 24, pag. 640-647, 2011
40. [Jiao, 2017] Jiao W., Liu W., Yang F., Jiang L., Jiao W. și Wang R., “Improving the interfacial property of carbon fiber/vinyl ester resin composite by grafting modification of sizing agent on carbon fiber surface”, *Journal of Materials Science*, Volume 52, Issue 24, pag 13812–13828, 2017
41. [Karpuz, 2005] Karpuz P., “Mechanical characterization of filament wound composite tubes by internal pressure testing”, *A thesis submitted to the graduate School of Natural and Applied sciences of Middle East Technical University*, 2005
42. [Koren, 1985] Koren Y., “Robotics for Engineers”, McGraw-Hill Book Company, 1985
43. [Kozaczuk, 2016] Kozaczuk K., “Automated fiber placement systems overview”, *Transactions of the institute of aviation*, no. 4 (245), pag 52-59, Warsaw, 2016
44. [Lange, 2005] Lange F. și Hirzinger G., “Calibration and Synchronization of a Robot-Mounted Camera for Fast Sensor-Based Robot Motion”, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation ICRA2005*, pag. 3900 – 3905, Barcelona, Spain, 2005
45. [Lischinsky, 1999] Lischinsky P., Cajudus-de-Wit C. și Morel G., “Friction Compensation for an Industrial Hydraulic Robot”, *IEEE Control Systems Magazine*, Volume 19, Issue 1, 1999
46. [Liu, 2017] Liu P. F. și Li X. K., “A Large-scale Finite Element Model on Micromechanical Damage and Failure of Carbon Fiber/Epoxy Composites Including Thermal Residual Stress”, *Applied Composite Materials*, Volume 25, Issue 3, pag 545–560, 2017
47. [Mathon, 2014] Mathon R., Phelippeau A., Gummel M.și Durand J., “Machine for Winding a Fiber Texture onto an Impregnation Mandrel, and the Use of Such a Machine for Making a Gas Turbine Casing Out of Composite Material”, *Aerospace and Defense Companies; Patent Application*, ProQuest, 2014
48. [Mazumdar, 1994] Mazumdar S. K., “Automated manufacturing of composite component by thermoplastic tape winding and filament winding”, PhD Thesis, Concordia University, 1994
49. [Minsch, 2017] Minsch N., Hermann F.H., Gereke T., Nocke A. și Cherif C., “Analysis of filament winding processes and potential equipment technologies”, *Procedia CIRP*, Volume 66, pag. 125-130, 2017
50. [Mogan, 2003] Mogan, G., “Proiectarea constructivă a sistemelor mecanice ale produselor mecatronice Roboți industriali”, Editura Universității Transilvania, 2003
51. [Mutasher, 2012] Mutasher S., Masiri N. și Lin L.C., “small-scale filament winding machine for producing fiber composite products”, *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 7, No. 2, pag. 156 – 168, 2012
52. [Namvar, 2005] Namvar M. și Aghili F., “Adaptive Force-Motion Control of Coordinated Robots Interacting With Geometrically Unknown Environments”, *Robotics, IEEE Transactions*, vol. 21 (4), pag. 678 – 694, 2005
53. [Neto, 2010] Neto P., Pires J. N. și Moreira A. P., “High-level programming and control for industrial robotics: using a hand-held accelerometer-based input device for gesture and posture recognition”, *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 37, pag. 137-147, 2010
54. [Oliveira, 2010] Oliveira A. , De Pieri E. și Moreno U., “An Open-architecture Robot Controller applied to Interaction Tasks”, *Advances in Robot Manipulators - InTech*, 2010
55. [Palok, 2016] Palok B., Shanmugam S. A., „Design and Development of a 3 axes Pneumatic Robotic Arm”, *International Journal of Advanced Research in*

- Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 5, Issue 9, 2016
56. [Păltinișanu, 2013] Păltinișanu C., “Materiale compozite pentru componente ale mecanismului de direcție”, *Lucrare de Disertație*, Universitatea Transilvania Brasov, 2013
57. [Parsons, 2002] Parsons I.D., White S., Therriault D. și Bignell J., „Manufacture and Testing of a Filament Wound Composite Bridge Superstructure”, *Innovations Deserving Exploratory Analysis Programs*, 2002
58. [Pires, 2005] Pires N. J., “Robot-by-voice: experiments on commanding an industrial robot using the human voice”, *Industrial Robot: An International Journal* , vol. 32(6), pag. 505-511, 2005
59. [Pires, 2007] Pires J. N., “Industrial robots programming: building applications for the factories of the future”, Springer US, 2007
60. [Pires, 2007b] Pires J.N., “Robot Manipulators and Control Systems”, *Industrial Robots Programming*, Springer, pag. 35-107, 2007
61. [Polini, 2005] Polini W. și Sorrentino L., “Influence of winding speed and winding trajectory on tension in robotized filament winding of full section parts”, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pag. 1574–1581, 2005
62. [Potter, 1999] Potter K.D. și Wisnom M. R., “Impact response of carbon fibre rod, with and without a tensioned kevlar overwind”, Department of Aerospace Engineering, Bristol University Queen's Building, University Walk, Bristol, 1999
63. [Ren, 2007] Ren S., Lu H., Wang Y. și Fu H., „Development of PLC-based Tension Control System”, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 20, pag. 266-271, 2007
64. [Rojas, 2012] Rojas J., Peters R.A., „Analysis of autonomous cooperative assembly using coordination schemes by heterogeneous robots using a control basis approach”, *Springer Science Business Media*, LLC, 2012
65. [Sbanca, 2014] Sbanca, M.P.: „Trajectory Planning for Winding Carbon Wire of Composite Structures Using Cooperative Robots”, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 656, pag. 280-287, 2014
66. [Sbanca, 2014b] Sbanca M. și Mogan G., "Cooperation of Two Industrial Robots for Manipulation Rigid Objects Using SCADA System", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 555, pag. 312-319, 2014
67. [Sbanca, 2015] Sbanca, M.P. și Mogan, G.L. „Winding of Carbon Wire Composite Structures Using Two Cooperative Industrial Robots”, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 762, pag. 291-298, 2015
68. [Sbanca, 2015b] Sbanca M. și Mogan G., “Cooperative assembly using two industrial robots”, *Proceedings of the 24th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*, pag. 47-57, 2015
69. [Sbanca, 2018] Sbanca M. P. și Mogan G. L., “Tensioned Carbon Fiber Winding on a Collaborative Robots Cell. Part 1 (System)”, *New Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science*, vol 57. Springer, pag. 437-444, 2018
70. [Sbanca, 2018b] Sbanca M. P. și Mogan G. L., “Tensioned Carbon Fiber Winding on a Collaborative Robots Cell. Part 2 (Tests)”, *New Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science*, vol 57. Springer, pag. 445-453, 2018
71. [Schmitt, 2012] Schmitt R. și Witte A., “Control of a thermoplastic tape winding process with optical in-line metrology”, *Proceedings in Manufacturing Systems*, Vol. 7, 2012
72. [Sguassero, 2012] Sguassero Nuova., „Filament winding fiberglass (GRP) pipes”, nuovaSquassero.it, 2012
73. [Shikany, 2014] Shikany A., “Collaborative Robots End User Industry Insights”, *International Collaborative Robots Workshop*, RIA, 2014
74. [Sirouspour, 2001] Sirouspour, M.R., și Salcudean S.E, "Nonlinear control of hydraulic robots" *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17.2, pag 173-182, 2001

75. [Steward, 2009] Steward R., "Filament winding spins light, strong composite structures with precision", *Reinforced Plastics*, Volume 53, Issue 5, Pages 34-39, 2009
76. [Stoica, 2011] Stoica M., "Contribuții la Programarea prin Demonstrare a Roboților Industriali din Celulele Flexibile de Fabricație", Transilvania University Brasov, 2011
77. [Todorov, 2010] Todorov E., "Identification and control of a pneumatic robot." *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on. IEEE, 2010.
78. [Toptas, 2017] Toptas E. și Akkus N., "Damage detection of carbon fibers in filament winding machines using an electrical resistance method", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 93, Issue 1-4, pag 671-679, 2017
79. [Vargas, 2004] Vargas G. și Miravete A., "Influence of the filament winding process variables on the mechanical behavior of a composite pressure vessel", *High Performance Structures and Materials II*, 2004
80. [Vaughan, 1974] Vaughan R. W. și Jones R.J., "Filament Winding S-glass/Polyimide resin composite processing studies", NASA Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1974
81. [Veiga, 2013] Veiga G., Malaca P. și Cancela R., "Interactive Industrial Robot Programming for the Ceramic Industry", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, 2013
82. [Vidican, 2009] Vidican C. A., "Contribuții privind optimizarea constructivă și funcțională a modulelor cu acționare electrică din structura roboților industriali", Oradea, 2009
83. [Wahl, 2002] Wahl, Friedrich M. și Ulrike Thomas. "Robot programming-From simple moves to complex robot tasks." *Institute for Robotics and Process Control, Technical University of Braunschweig*, 2002
84. [Wang, 2008] Wang J., Zhang H. și Fuhlbrigge A., „Force Control Technologies for New Robotic Applications”, *TePRA IEEE*, pag. 143 – 149, 2008
85. [Warren, 2011] Warren C.D., „Low Cost Carbon Fiber Overview”, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831-8050, 2011
86. [Winkler, 2013] Winkler A. și Suchy J., "Robot Force/Torque Control in Assembly Tasks", 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control International Federation of Automatic Control, Saint Petersburg, Russia, June 19-21, 2013
87. [Xiao, 2011] Xiao Y., Huang S., Chen H. și Xu B., "Research on Tension Control Strategy of Battery Pole-piece Winding and Unwinding System Based on Fault-tolerant Control", *Procedia Engineering*, Vol. 15, , pag. 5073 – 5078, 2011
88. [Xiaodong, 2016] Xiaodong H., Yaoyao S., Chao K., „Research on Fuzzy Control Based Flexible Composite Winding System”, *Advances in Fuzzy Systems*, 2016
89. [Yan, 2014] Yan L., Cne Z., Shi Y. și Mo R., "An accurate approach to roller path generation for robotic fibre placement of free-form surface composites", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 30, pag. 277-286, 2014
90. [Zacharia, 2013] Zacharia P., Xidias E. și Aspragathos N., "Task scheduling and motion planning for an industrial manipulator", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, pag. 449-462, 2013
91. [Zhao, 2010] Zhao H., Wang C. și Guo Z., "Coordinated Dynamics Control of a Free-Floating Dual-arm Space Robot", *Modern Applied Science*, Vol. 4, No. 5, 2010

REZUMAT

Prezenta teză de doctorat *Cercetări privind înfășurarea robotizată a fibrelor de carbon în matrițele suport ale structurilor compozite* are ca și obiectiv realizarea unui nou sistem de înfășurare a fibrelor de carbon pentru obținerea de structuri compozite. Pentru atingerea acestui obiectiv, cercetările realizate urmăresc studiul, concepția, dezvoltarea, implementarea și testarea unui sistem integrat de înfășurare a fibrei de carbon care utilizează un controler master prin intermediul căruia se realizează colaborarea a doi roboți industriali. Aceștia sunt utilizați în mod colaborativ unul având rolul de susținere a unei matrițe și deplasare a acesteia, în timp ce al doilea robot are rolul de înfășurare a fibrei de carbon în jurul matriței, pe ambele fețe ale acesteia. Pentru a putea realiza produse de calitate ridicată într-un timp de ciclu relativ scurt, a fost implementat un sistem nou de pretensionare a fibrei autocontrolat. Acesta are rolul de a menține fibra tensionată la o valoare nominală pe tot parcursul procesului de înfășurare. Prin implementarea unor sisteme de reglare automată, utilizând regulatoare de tip PID, s-a putut realiza o ajustare de precizie a tensionării fibrei de carbon. Au fost realizate teste experimentale pentru verificarea și analiza rezultatelor, atât în mediul real cât și în medii virtuale de testare precum Robot Studio. În urma testelor experimentale și a rezultatelor obținute, se arată că SROC-ÎNF poate realiza înfășurări ale fibrei cu tensionare variabilă în matrițe cu configurații complexe ale traseelor de înfășurare, pentru a obține structuri compacte ale pachetului de fibră tensionată constant, conform cerințelor de produs. Sistemul de roboți colaborativi, a fost supus și altor teste experimentale de manipulare și asamblare colaborativă, pentru a demonstra capabilitățile acestuia.

ABSTRACT

The present research *Researches regarding robotic fiber winding in support matrix of composite structures* aims to obtain a new carbon fiber winding system in order to produce composite structures. To achieve this objective, the research focuses on the study, design, development, implementation and testing of an integrate carbon fiber winding system using two industrial robots controlled by an external master controller. The industrial robots have been used in a collaborative method, one of them responsible with matrix holding and movement and the other one responsible of the carbon fiber winding across the matrix on both faces. In order to create high quality products in a relative short cycle time, it has been implemented a new carbon fiber pre-tensioning auto control device. This had the role of continuously tension of the carbon fiber to a nominal parameter for the complete winding process. By implementing an automatic control system, using PID control methods, it has been possible to realize a precise tension adjustment of the carbon fiber. In order to validate and analyze the results, testing experiments have been proposed, in both real and virtual environments, like Robot Studio. In conclusion using the SROC-INF system can be realize carbon fiber winding with variable tensioning on complex configuration matrix, in order to obtain compact fiber tensioned structures. The integrated industrial robots collaborative system realize in this research, have been tested and analyze also in experiments like collaborative handling and assembly processes, based on external force signal feedback processing.



Nume / Prenume **Sbanca Mădălin-Petru**
Adresă(e)
Telefon(oane)
E-mail(uri)
Naționalitate(-tăți) Română
Data nașterii

Experiența profesională

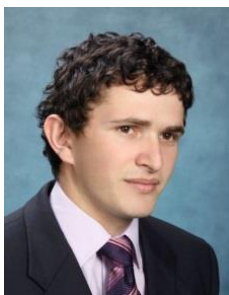
01.10.2018 - Prezent Team Leader Echipamente și procese, STABILUS România
01.11. 2012 - 01.10.2018 Inginer automatist, STABILUS România
20.02 2012 - 01.11.2012 Inginer junior/ Inginer mentenanță, STABILUS România
01.11.2009 - 01.10.2011 Voluntar, AIESEC Brașov

Educație și formare

01.10.2014 - prezent Doctor în robotică, Titlul tezei de doctorat - *Cercetări privind înfășurarea robotizată a fibrelor de carbon în matrițele suport ale structurilor compozite*, Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Mecanică, domeniul Inginerie Industrială
01.10.2016 - 03.07.2018 Diplomă Master în Managementul Afacerilor în Industrie, Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial
01.10 2012 - 26.06.2014 Diplomă Master în mecatronică și robotică obținută cu media 10, Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Mecanică, Catedra de Robotică și Realitate Virtuală, profil Informatica Mediilor Virtuale.
01.10.2008 - 05.07.2012 Diplomă în automatică și informatică aplicată obținută cu media 9, Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Electrică și știința Calculatoarelor, profil Automatică și Informatică Aplicată

Aptitudini și competențe personale

Limba(i) străină(e) cunoscută(e) Engleză (B2), Germană (A2)
Competențe și aptitudini tehnice Programare Automate programabile în Step 7, Step 5, Logo Soft Comfort și LabView , citire și creare Scheme electrice de principiu, Programare braț robotic ABB și Staubli
Competențe și aptitudini de utilizare a calculatorului MS Office, Corel, Sony Vegas
Publicații științifice 3 lucrări în proceedings IEEE/ISI
3 lucrări indexate BDI
1 brevet de invenție
Participare la conferințe internaționale în Romania



First name(s) / Surname(s) **Mădălin-Petru Sbanca**

Address(es)

Telephone(s)

E-mail

Nationality Romanian

Date of birth

Work experience

- 01.10.2018 - Present Team leader Equipment and process, STABILUS Romania
01.11. 2012 - 01.10.2018 Automation engineer/ System engineer, STABILUS Romania
20.02 2012 - 01.11.2012 Junior engineer/ maintenance engineer, STABILUS Romania
01.11.2009 - 01.10.2011 Volunteer, AIESEC Brasov

Education and training

- 01.10.2014 - present Doctoral School (PHD) in robotics, *Researches regarding robotic fiber winding in support matrix of composite structures*, Transylvania University of Brasov, Faculty of Mechanic Engineering, field of Industrial Engineering
01.10.2016 - 03.07.2018 Master degree in Industrial Management, Transylvania University of Brasov, Faculty of Mechanic Engineering, Department of Robotics and Virtual reality, Virtual environment informatics class
01.10 2012 - 26.06.2014 Master degree in mechatronics and robotics, Transylvania University of Brasov, Faculty of Mechanic Engineering, Department of Robotics and Virtual reality, Virtual environment informatics class.
01.10.2008 - 05.07.2012 Bachelor degree in automation and computer science, Transylvania University of Brasov, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Field of work Automation.

Personal skills and competences

- Foreign language(s) English (B2), German (A2)
Technical skills and competences Programmable Logical Controller programing in Step 7, Step 5, Logo Soft Comfort and Labview
Recognize and create an wiring diagram, ABB and Staubli Robotic Arm programing
Computer skills and competences MS Office, Corel Sony Vegas
Scientific publications 3 papers in proceedings IEEE/ISI
3 papers BDI indexed
1 invention patent
Participation at international conferences in Romania