

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

Aplicarea conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0 la modelarea și conducerea proceselor de fabricație flexibilă

Doctorand,

Ing. Octavian-Gabriel DUCA

Conducător științific,

Prof. dr. ing. Eugenia MINCĂ

Seria I 8: Ingineria sistemelor Nr. 10

GALAȚI

2023

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

**Aplicarea conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0 la modelarea și
conducerea proceselor de fabricație flexibilă**

Doctorand

Ing. Octavian-Gabriel DUCA

Președinte

Prof univ.dr.ing. Marian BARBU
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

Conducător științific,

Prof univ.dr.ing. Eugenia MINCĂ
Universitatea Valahia din Târgoviște

Referenți științifici

Prof univ.dr.ing. Ioana FĂGĂRĂȘAN
Universitatea Politehnica din București

Prof univ.dr.ing. Grigore STAMATESCU
Universitatea Politehnica din București

Conf. univ. dr. ing. Daniela Cristina CERNEGA
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

Seria I 8: Ingineria sistemelor Nr. 10

GALAȚI

2023

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINȚE INGINEREȘTI

- Seria I 1: **Biotehnologii**
- Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
- Seria I 3: **Inginerie electrică**
- Seria I 4: **Inginerie industrială**
- Seria I 5: **Ingineria materialelor**
- Seria I 6: **Inginerie mecanică**
- Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
- Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria E 3: **Marketing**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ și ȘTIINȚE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**
- Seria F: **Farmacie**

Prefață

Această teză constituie rezultatul activității de cercetare din perioada octombrie 2019 – martie 2023 în domeniul Ingineriei Sistemelor din cadrul Facultății de Automatică, Calculatoare, Inginerie Electrică și Electronică a Universității „Dunărea de Jos” din Galați..

Menționez că cercetarea teoretică, activitatea experimentală, concepția/redactarea tezei de doctorat s-au realizat cu suportul logistic și financiar asigurate prin derularea proiectului complex UEFISCDI CIDSACTEH, număr proiect PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0290, în care au colaborat echipe de cercetare de la Universitatea „Dunărea de Jos”- coordonator, Universitatea Valahia din Târgoviște, Universitatea Politehnica București și Universitatea din Craiova.

Doresc să-mi exprim profunda recunoștință conducătorului de doctorat, doamnei Prof.dr.ing. Eugenia Mincă pentru îndrumarea acordată, implicarea și recomandările făcute și pentru suportul moral și înțelegerea oferite în toată această perioadă de cercetare.

Mulțumesc comisiei de îndrumare formată din domnii profesori: Prof.dr.ing.Adrian Filipescu, Conf.dr.ing.Daniela Cernega și Conf.dr.ing.Răzvan Șolea pentru sfaturile și ajutorul acordat pe parcursul elaborării tezei de doctorat, sfaturi fără de care nu ar fi fost posibilă concretizarea acestei lucrări.

Nu în ultimul rând, mulțumesc familiei mele pentru susținerea necondiționată, înțelegerea și iubirea oferită pe parcursul acestei perioade, care m-au motivat și au creat condițiile propice pentru a finaliza teza de doctorat.

Mulțumesc tuturor celor care, direct sau indirect, m-au ajutat și m-au sprijinit de-a lungul acestor ani în care am elaborat această lucrare.

Mulțumesc mult!

*Galați, Aprilie 2023
Ing. Octavian Gabriel DUCA*

Cuprins

Introducere	1
Etape ale evoluției industriale până la Industria 4.0	1
Concepte și tehnologii specifice Industriei 4.0 integrate în procesele de fabricație flexibilă	2
Smart Factory	3
Cyber-Physical System (CPS).....	3
Internet of Everything	4
Cloud Computing	5
Integrarea sistemelor pe verticală și orizontală.....	6
Concepte și tehnologii specifice Industriei 5.0, integrate în procesele de fabricație flexibilă	6
Obiectivele cercetării și evaluarea sistematică a rezultatelor	9
Structura tezei pe capitole	10
Introduction	12
Stages of the industrial evolution up to Industry 4.0	12
Concepts and technologies specific to Industry 4.0 integrated into flexible manufacturing processes.....	13
Smart Factory	14
Cyber-Physical System (CPS).....	14
Internet of Everything	15
Cloud Computing	16
Vertical and horizontal system integration	16
Concepts and technologies specific to Industry 5.0 integrated into flexible manufacturing processes.....	17
Research objectives and systematic evaluation of results.....	19
The structure of the thesis by chapters	21
Capitolul 1. Tehnici de adaptare a liniilor pentru fabricația în flux, la sisteme integrate pentru fabricația flexibilă, în abordare specifică Industriilor 4.0 și 5.0..	23
1.1. Sisteme de producție pentru fabricația în flux.....	23
1.1.1. Caracteristicile sistemelor pentru fabricația în flux.....	24
1.1.2. Fabricația în flux și structura hardware a sistemului de laborator.....	26
1.1.3. Modelarea cu RPS a fabricației în flux.....	29
1.1.4. Simulări ale modelului RPS pentru determinarea parametrilor specifici fabricației în flux	31
1.2. Tehnici de adaptare a sistemului pentru fabricația în flux, la fabricația flexibilă, cu aplicarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0	32
1.2.1. Proiectarea hardware a sistemului pentru fabricația flexibilă în flux	33

1.2.2. Fabricația în celula flexibilă, ca subproces al fabricației pe ISFM	36
1.3. Structura hardware a sistemului integrat pentru fabricația flexibilă cu două fluxuri paralele. Aplicarea unor concepte specifice Industriilor 4.0 și 5.0	37
1.4. Rezultate și contribuții științifice	45
Capitolul 2. Modelarea dinamicii sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, din perspectiva conducerii cu Digital twin	48
2.1. Modelarea cu RPS a dinamicii sistemului integrat pentru fabricația flexibilă cu două fluxuri de producție paralele	48
2.2. Modelarea cu RPS a proceselor de fabricație/asamblare flexibilă în stații	52
2.2.1. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 1	53
2.2.2. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 2	56
2.2.3. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 3	60
2.2.4. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 4	64
2.2.5. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 5	67
2.2.6. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 6	72
2.3. Rezultate și contribuții științifice	75
Capitolul 3. Conducerea automată a operațiilor de transport și poziționare precisă în stațiile ISFM, subordonată conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0	77
3.1. Structura de conducere cu algoritm PID	78
3.2. Algoritm de conducere cu PID bazat pe evenimente	80
3.3. Proiectarea conducerii cu algoritm PID_E pentru transport și poziționare, în stațiile de lucru	82
3.4. Implementarea conducerii cu PID_E a operațiilor de transport și poziționare precisă	89
3.5. Rezultate și contribuții științifice	92
Capitolul 4. Planificarea optimă a fabricației flexibile cu fluxuri paralele	95
4.1. Proiectarea algoritmului de planificare optimă a fabricației flexibile cu două fluxuri paralele	97
4.1.1. Analiza fabricației în flux pe o stație a FFM. Determinarea mărimilor caracteristice	97
4.1.2. Analiza fabricației paralele pe fluxurile FFM și FMC	99
4.2. Algoritm pentru planificarea optimă a fabricației paralele, pe fluxurile FFM și FMC	101
4.3. Rezultate și contribuții științifice	105
Capitolul 5. Implementarea planificării optime a fabricației flexibile pe fluxuri paralele, în abordare specifică conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0	107
5.1. Implementarea și testarea planificării optime a fabricației flexibile cu două fluxuri paralele. Studiu de caz	107
5.2. Aplicație Client-Server pentru planificarea optimă a fabricației paralele, în abordare specifică Industriilor 4.0 și 5.0	111

5.3. Rezultate și contribuții științifice	116
Capitolul 6. Concluzii și contribuții științifice	118
6.1. Contribuții științifice	121
6.2. Direcții de cercetare viitoare.....	121
6.3. Diseminarea rezultatelor	123
6.3.1. Lucrări științifice publicate în reviste	124
6.3.2. Lucrări științifice publicate în proceeding-uri la conferințe internaționale...	124
Bibliografie	126

Content

Introduction (Romanian)	1
Stages of the industrial evolution up to Industry 4.0	1
Concepts and technologies specific to Industry 4.0 integrated into flexible manufacturing processes.....	2
Smart Factory	3
Cyber-Physical System (CPS).....	3
Internet of Everything	4
Cloud Computing	5
Vertical and horizontal system integration	6
Concepts and technologies specific to Industry 5.0 integrated into flexible manufacturing processes.....	6
Research objectives and systematic evaluation of results.....	9
The structure of the thesis by chapters	10
Introduction (English)	12
Stages of the industrial evolution up to Industry 4.0	12
Concepts and technologies specific to Industry 4.0 integrated into flexible manufacturing processes.....	13
Smart Factory	14
Cyber-Physical System (CPS).....	14
Internet of Everything	15
Cloud Computing	16
Vertical and horizontal system integration	16
Concepts and technologies specific to Industry 5.0 integrated into flexible manufacturing processes.....	17
Research objectives and systematic evaluation of results.....	19
The structure of the thesis by chapters	21
Chapter 1. Techniques for adapting lines for flow manufacturing to integrated systems for flexible manufacturing, in a specific approach to Industries 4.0 and 5.0	23
1.1. Production systems for flow manufacturing.....	23
1.1.1. Characteristics of systems for flow manufacturing	24
1.1.2. Flow manufacturing and hardware structure of the laboratory system	26
1.1.3. RPS modeling of flow manufacturing.....	29
1.1.4. RPS model simulations to determine flow manufacturing specific parameters	31
1.2. System adaptation techniques for flow manufacturing to flexible manufacturing with the application of Industries 4.0 and 5.0 concepts	32
1.2.1. System Hardware Design for Flexible Flow Manufacturing	33

1.2.2. Manufacturing in the flexible cell as a sub-process of ISFM manufacturing	36
1.3. Hardware structure of the integrated system for flexible manufacturing with two parallel streams. Application of specific concepts of Industries 4.0 and 5.0	37
1.4. Scientific results and contributions	45
Chapter 2. Modeling the dynamics of the integrated system for flexible manufacturing, from the control perspective with Digital	48
2.1. RPS modeling of integrated system dynamics for flexible manufacturing with two parallel production streams	48
2.2. RPS modeling of flexible manufacturing/assembly processes in stations	52
2.2.1. RPS Modeling of Flexible Manufacturing in Station 1	53
2.2.2. RPS Modeling of Flexible Manufacturing in Station 2	56
2.2.3. RPS Modeling of Flexible Manufacturing in Station 3	60
2.2.4. RPS Modeling of Flexible Manufacturing in Station 4	64
2.2.5. RPS Modeling of Flexible Manufacturing in Station 5	67
2.2.6. RPS Modeling of Flexible Manufacturing in Station 6	72
2.3. Scientific results and contributions	75
Chapter 3. Automatic control of transport operations and precise positioning in ISFM stations, subject to the concepts of Industry 4.0 and 5.0	77
3.1. Control structure with PID algorithm	78
3.2. Event-based PID driving algorithm	80
3.3. Driving design with PID_E algorithm for transport and positioning in workstations	82
3.4. Implementation of PID_E control of transport and precise positioning operations	89
3.5. Scientific results and contributions	92
Chapter 4. Optimal planning of flexible manufacturing with parallel flows	95
4.1. Algorithm Design for Optimal Scheduling of Flexible Manufacturing with Two Parallel Flows	97
4.1.1. Analysis of flow manufacturing on one station of FFM. Determination of characteristic sizes	97
4.1.2. Analysis of parallel manufacturing on FFM and FMC flows	99
4.2. Algorithm for optimal scheduling of parallel manufacturing, on FFM and FMC flows	101
4.3. Scientific results and contributions	105
Chapter 5. Implementation of optimal planning of flexible manufacturing on parallel flows, in a specific approach to Industry 4.0 and 5.0 concepts	107
5.1. Implementation and testing of optimal scheduling of flexible manufacturing with two parallel streams. Case Study	107
5.2. Client-Server application for optimal planning of parallel manufacturing, in a specific approach to Industries 4.0 and 5.0	111

5.3. Scientific results and contributions	116
Chapter 6. Conclusions and scientific contributions	118
6.1. Scientific contributions	121
6.2. Future research directions	121
6.3. Dissemination of results	123
6.3.1. Scientific papers published in journals.....	124
6.3.2. Scientific papers published in proceedings at international conferences...	124
Bibliography	126

Listă de Figuri

Figura 1. a) Elemente componente ale produsului asamblat pe linia de fabricație de laborator; b) Schema bloc aferentă succesiunii operațiilor de fabricație în flux.	26
Figura 2. Arhitectura sistemului de conducere a liniei de fabricație	27
Figura 3. a) Modelul Solidworks al stației de dezasamblare; b) Stația de dezasamblare completă, deservită de un robot cartezian c) Robot mobil Pioneer pentru transport și recuperare componente	28
Figura 4. Modelul RPS al sistemului de laborator pentru fabricația în flux.....	31
Figura 5. Duratele operațiilor pentru asamblarea unui produs, din stațiile S1-S5	32
Figura 6. Succesiunea operațiilor din stații pentru fabricația în flux și flexibilă. a) Fabricația în flux deservită de MR1, MR2, a unui produs Tip 2; b) Fabricația în flux deservită de un MR2, a unui produs Tip 2; c), d) e) Fabricația flexibilă deservită de MR2, pentru produse Tip 1, cu repetarea operațiilor din Stațiile 4, 5, în diferite combinații.....	33
Figura 7. a) Componentele produsului Tip 1 asamblat pe IFMS; b) Schema bloc a planificării operațiilor de asamblare a produsului multistrat, pe IFMS.....	34
Figura 8. Sistem integrat pentru fabricația flexibilă echipat cu sisteme robotice, pentru operațiile de manipulare, asamblare, transport	35
Figura 9. Sistemul integrat pentru fabricația flexibilă în flux (FFM) și fabricația în Celula flexibilă (FMC)	35
Figura 10. Succesiunea operațiilor de asamblare și transport pentru fabricația unui produs Tip 1 pe FFM	36
Figura 11. Stația 3 – Celula flexibilă echipată cu manipulator ABB	36
Figura 12. Succesiunea operațiilor pentru fabricația flexibilă în FMC	37
Figura 13. a) IFMS_4.0_5.0 cu două fluxuri paralele, deservit de trei manipuloare robotice (ABB, FANUC, SCARA) și un robot mobil (PIONEER); b) Stația de dezasamblare din IFMS_4.0_5.0; c) Fabricația flexibilă deservită de sistemul robotic SCARA	38
Figura 14. Stația 1 dedicată asamblării componentei <i>pallet</i>	39
Figura 15. Stația 2 dedicată asamblării componentei <i>base</i>	40
Figura 16. Stația 3 – Celula flexibilă echipată cu manipulator industrial ABB	41
Figura 17. Stația 4 dedicată asamblării componentelor <i>big parts</i> și <i>small parts</i>	42
Figura 18. Stația 5 dedicată asamblării componentei <i>top</i>	43
Figura 19. Stația 6 dedicată controlului de calitate (QC) și stocării produselor conforme	44
Figura 20. a) Modelul Solidworks al SRTS; b) Fabricație flexibilă deservită de sistemul robotic SCARA	45
Figura 21. Modelul RPS asociat fabricației flexibile pe un sistem de producție, cu două fluxuri paralele	50
Figura 22. Rezultatele simulării modelului RPT asociat IFMS	52
Figura 23. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației din Stația 1	53
Figura 24. Modelul RPS asociat procesului de fabricație din Stația 1	54
Figura 25. a) Rezultatele simulării modelului RPS_{S1} aferente procesului de asamblare și sincronizării cu citirea/scrierea datelor pentru produsele Tip 2; b) Rezultatele simulării modelului RPS_{S1} aferente procesului de asamblare și sincronizării cu citirea/scrierea datelor pentru produsele Tip 1.	56

Figura 26. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației din Stația 2.....	57
Figura 27. Modelul RPS asociat procesului de fabricație din Stația 2	58
Figura 28. Rezultatele simulării modelului RPS_{S_2} corespunzător operațiilor de asamblare, transport, transfer informațional și de sincronizare cu operațiile de citire/scriere a datelor, pentru produsul Tip 1	59
Figura 29. a) Schema bloc a operațiilor aferente fabricației în flux din Stația 3; b) Schema bloc a operațiilor aferente fabricației flexibile în celulă din Stația 3	60
Figura 30. Modelul RPS asociat fabricației flexibile din Stația 3 - Celula Flexibilă	61
Figura 31. Rezultatele simulării modelului RPS_{S_3} corespunzător proceselor paralele de fabricație flexibilă în flux (FFM) și în celulă (FMC), pentru un produs Tip1 ..	63
Figura 32. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației flexibile din Stația 4	64
Figura 33. Modelul RPS asociat fabricației flexibile din Stația 4	65
Figura 34. Rezultatele simulării modelului RPS_{S_4} corespunzătoare asamblării unui produs Tip 1 cu patru componente pe stratul intermediar, și sincronizările cu operațiile de citire/scriere date	67
Figura 35. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației flexibile din Stația 5	68
Figura 36. Modelul RPS asociat fabricației flexibile din Stația 5	69
Figura 37. Rezultatele simulării modelului RPS_{S_5} corespunzător asamblării unui produs Tip 1 și sincronizărilor cu operații de citire/scriere date	71
Figura 38. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației din Stația 6	72
Figura 39. Modelul RPS asociat procesului de fabricație din Stația 6	73
Figura 40. Rezultatele simulării modelului RPS_{S_6} corespunzător operațiilor de: controlul calității, depozitare, dezasamblare din Stația 6	75
Figura 41. Poziționarea senzorilor într-o stație de lucru	78
Figura 42. a) Monitorizarea poziției produsului, pe conveyor; b) Monitorizarea conducerii sistemului de transport	83
Figura 43. Model Simulink al structurii de conducere a transport și poziționare de precizie pe conveyor, sub acțiunea perturbațiilor	83
Figura 44. Model Simulink corespunzător structurii de conducere cu PID, sub acțiunea perturbațiilor	84
Figura 45. a) Rezultatele simulării în Matlab PID Tuner a structurii de conducere cu PD, sub acțiunea perturbațiilor; b) Rezultatele simulării în Matlab PID Tuner a structurii de conducere cu PID, sub acțiunea perturbațiilor.	84
Figura 46. a) Parametrii controlerului, performanțele și robustețea pentru conducerea cu algoritm PD; b) Parametrii controlerului, performanțele și robustețea răspunsului pentru conducerea cu algoritm PID	85
Figura 47. Rezultate ale simulării conducerii cu PD a procesului de transport și poziționare, sub acțiunea perturbațiilor: a) Poziționarea în raport cu referința și; b) viteza de transport a benzii transportoare	86
Figura 48. Rezultate ale simulării conducerii cu PID a procesului de transport și poziționare, sub acțiunea perturbațiilor: a) Poziționarea în raport cu referința și; b) viteza de transport a benzii transportoare	87
Figura 49. Modelul RPT asociat algoritmului PID_E, pentru controlul operațiilor de transport și poziționare în stație	90
Figura 50. Simularea modelului RPT corespunzător conducerii cu algoritm PID_E și controlul operațiilor de transport, poziționare, asamblare, cu evaluarea duratelor și sincronizărilor operațiilor	90
Figura 51. Monitorizarea pozițiilor succesive pentru conducerea cu Algoritm PID_E ..	91
Figura 52. Monitorizarea comenzii pentru conducerea cu Algoritm PID_E.....	92

Figura 53. Succesiunea operațiilor de transport și asamblare din stația k	98
Figura 54. Succesiunea operațiilor de transport și asamblare, pentru fabricația flexibilă pe fluxurile paralele, FFM și FMC	99
Figura 55. a) Planificarea fabricației unui produs Tip 1 pe FFM; b) Planificarea fabricației unui produs Tip 1 pe FMC; c) Planificarea fabricația unui produs Tip 2 pe FFM; d) Planificarea fabricației unui de volum de 25 de produse, pe fluxurile paralele FFM și FMC, fără optimizarea secvențelor de așteptare:	108
Figura 56. a) Secvența de inițializare a planificării optimale a fabricației pe fluxurile FFM și FMC; b) Planificarea optimală a unui ciclu de producție pentru secvențe repetitive ale fabricației, pe fluxurile paralele FFM și FMC.....	109
Figura 57. a) Secvența de inițializare din cadrul planificării optimale a fabricației; b) Secvența optimală de producție obținută în urma planificării; c) Planificarea optimală a fabricației unui volum de 25 de produse, pe fluxurile paralele FFM și FMC.....	110
Figura 58. Dinamica fluxului de date Client – Sistem de fabricație.....	111
Figura 59. Modelul RPS pentru colectarea și prelucrarea informațiilor de producție .	113
Figura 60. Simularea modelului RPS al Aplicației Client-Server.....	114
Figura 61. a) Interfața de configurare a unui produs Tip 1 în Aplicația Client-Server; b) Interfața de configurarea unui produs cu Tip 2 în Aplicația Client-Server..	115
Figura 62. Aplicație Client-Server conectată cu sistemul integrat pentru fabricația flexibilă	116

Notății și Abrevieri

IoT	- Internet of Things (Internetul lucrurilor)
IoE	- Internet of Everything (Internetul în orice)
IoS	- Internet of Services (Internetul serviciilor)
RFID	- Radio Frequency Identification (Identificare prin radio-frecvență)
ERP	- Enterprise Resource Planning (Planificare resurselor în companie)
CPS	- Cyber-Physical System (Sisteme cyber-fizice)
XaaS	- Anything as a Service (Orice ca serviciu)
DBaaS	- Database as a Service (Baze de date ca serviciu)
KaaS	- Knowledge as a Service (Cunoștințe ca serviciu)
BPaaS	- Business Process as a Service (Procese în afaceri ca serviciu)
SaaS	- Software as a Service (Software ca serviciu)
PaaS	- Platform as a Service (Platformă ca serviciu)
IaaS	- Infrastructure as a Service (Infrastructură ca serviciu)
RPT	- Rețele Petri Temporizate
RPS	- Rețele Petri Sincronizate
IFS	- In Flux System (Sistem în flux)
QC	- Quality Control (Control calitate)
IFMS	- Integrated Flexible Manufacturing System (Sistem integrat pentru fabricația flexibilă)
FFM	- Flux Flexible Manufacturing (Fabricație flexibilă în flux)
FMC	- Flexible Manufacturing in Cell (Fabricație flexibilă în celulă)
SCARA	- Selective Compliance Articulated Robot Arm (Braț robot articulată de conformitate selectivă)
SRTS	- SCARA Robotic Transportation System (Sistem de transport cu robot SCARA integrat)
PLC	- Programmable Logic Controller (Automat programabil)
PID_E	- PID bazat de evenimente

Introducere

În ultimii ani, interesul pentru noua revoluție industrială, denumită *Industrie 4.0*, a crescut semnificativ. Această revoluție integrează un set de concepte avansate - *Smart Factory*, *Big Data*, *Realitate Augmentată*, *Cyber-Physical Systems*, Internetul lucrurilor – *Internet of Things* (IoT) și *Internet of Everything* (IoE), care aduc modificări radicale în structura hardware a sistemelor dar și în structura arhitecturilor de control. Industria 4.0 reprezintă o provocare majoră, în special din perspectiva diversității actorilor implicați în cadrul internetului lucrurilor. În acest context, este importantă cunoașterea etapelor evoluției industriale, precum și conceptele principale care stau la baza Industriei 4.0.

Conceptele Industriei 4.0 stau la baza dezvoltării următoarei etape a evoluției industriale, Industria 5.0, care se situează mai degrabă în complementaritate față de conceptele 4.0. Industria 5.0 readuce în ecuația ecosistemelor industriale factorul uman, promovând integrarea operatorului în centrul proceselor industriale. Această evoluție se concentrează pe aspecte de sustenabilitate, etică, diversitate și impact redus asupra mediului, propunând o schimbare completă de paradigmă. Astfel se propune trecerea de la lumea „rece” a tehnologiei, a datelor, ecosistemelor și mașinilor, orientată pe creșterea productivității și reducerea costurilor, la o dezvoltare holistică, care își propune întoarcerea forței de muncă în fabrici, creșterea interoperabilității om-mașină, producție distribuită, hiper-personalizare, reintegrarea dimensiunii umane, sociale și de mediu în realitatea lumii economice.

Etape ale evoluției industriale până la Industria 4.0

Încă din antichitate, activitățile semnificative de producție - agricultura, transportul sau producția de textile, se realizau prin munca manuală. Această metodă de producție impunea un proces îndelungat de dezvoltare și îmbunătățire a produselor, fiind realizat preponderent prin încercări succesive, cu scopul înlăturării erorilor. Un eveniment importantă în istoria industrializării a fost reprezentată de prima revoluție industrială, denumită și Industria 1.0.

Prima revoluție industrială a avut loc în cea de-a doua jumătate a secolului al XVIII-lea și a durat până la mijlocul secolului al XIX-lea. Această revoluție a fost influențată de apariția pompei de apă și a motorului cu abur, care au permis mecanizarea proceselor de producție și transformarea sistemelor de producție manuală în sisteme de fabricație [1, 2]. Utilizarea motoarelor cu abur a permis extracția și producția de bunuri într-un timp mult mai scurt.

A doua revoluție industrială, cunoscută sub numele de Industria 2.0, a început la sfârșitul secolului al XIX-lea și a durat până la începutul secolului al XX-lea [1, 3]. Această etapă de transformare a fost influențată de apariția electricității și de dezvoltarea divizării muncii [2, 4]. Aceste elemente au permis fabricarea de produse pe linii de producție. În plus, această dezvoltare a dus la apariția motorului cu ardere internă și la descoperirea de noi surse de energie, cum ar fi electricitatea și combustibilii fosili, precum și apariția de noi mijloace de transport.

În perioada anilor 1960 și până la începutul secolului XXI [2], a avut loc a treia etapă majoră în evoluția producției, numită Industria 3.0. Această revoluție industrială, cunoscută și sub numele de revoluția digitală [1], a urmărit utilizarea tehnologiei informației și a circuitelor electronice pentru a sporii productivitatea și a îmbunătății procesele de producție [4, 2, 1]. În această fază a revoluției industriale, utilizarea circuitelor logice programabile, împreună cu automatizarea industrială, au permis dezvoltarea de noi tehnologii de producție, ceea ce a dus

la creșterea semnificativă a capacității de dezvoltare a produselor și serviciilor, precum și la reducerea parțială a erorilor din mediul de producție.

De asemenea, Industria 3.0 a facilitat dezvoltarea și implementarea surselor de energie și mijloacelor de producție și transport mai ecologice. Utilizarea pe scară largă a tehnologiei informației a permis, de asemenea, apariția și utilizarea tehnologiilor inteligente, ceea ce a dus la o mai mare eficiență a proceselor de producție.

Concepte și tehnologii specifice Industriei 4.0 integrate în procesele de fabricație flexibilă

Conceptul *Industrie 4.0* a fost introdus la Hanover Trade Fair în 2011, deși unele surse susțin că a patra revoluție industrială a debutat la începutul secolului XXI. Conform literaturii de specialitate, această evoluție industrială se caracterizează prin integrarea inteligenței artificiale în procesele de producție, dar în general este considerată ca având drept scop principal creșterea eficienței și productivității sistemelor de fabricație [5].

Pentru a atinge nivelul dorit de eficiență și productivitate a proceselor industriale, au fost implementate o serie de noi tehnologii, inclusiv Realitatea Augmentată, analiza *Big Data*, *Cyber-Physical Systems*, *Cloud computing* și *Internet of Everything*, printre altele. Toate aceste tehnologii sunt utilizate pentru a reconfigura sistemele de producție, în modele cu structura ierarhică, denumite 5C [6]. Modelul ierarhic cuprinde următoarele niveluri:

- Conectarea (*Connectivity*): este reprezentată de cuplarea echipamentelor și a entităților de tip IoE la o rețea și utilizarea unui sistem comun de comunicație [7]. Așa cum este prezentat și în [3], aceasta permite entităților să inițieze un prim contact, în sensul validării potențialului de comunicare, urmat de comunicația efectivă;
- Comunicarea (*Communication*): începând cu momentul în care entitățile sunt conectate, acestea pot transmite mesaje în sensul schimbului de informații sau în sensul stabilirii de interacțiuni [8]. Această comunicare înseamnă că ambele entități pot “înțelege” informația transmisă [9]. Aceste două niveluri, de Conectare și Comunicare, sunt esențiale în obținerea interoperabilității, dar și în coordonarea, cooperarea și colaborarea între diverse procese;
- Coordonarea (*Coordination*): este realizată de o entitate centrală care asigură execuția coerentă a sarcinilor unui sistem, în baza unor criterii prestabilite [10]. Această coordonare este determinată de integrarea pe verticală a proceselor, astfel încât sistemele de producție să fie interconectate eficient cu nivelurile decizionale [11];
- Cooperarea (*Cooperation*): este reprezentată de posibilitatea negocierii între diverse entități inter-sistemice sau intra-sistemice pentru realizarea unei anumite sarcini [12]. Acest lucru permite realizarea mai multor sarcini concomitent, prin cooperarea informațională între entități, conform unor obiective prestabilite [13];
- Colaborarea (*Collaboration*): este reprezentată de entități din cel puțin două sisteme care lucrează împreună pentru a realiza o sarcină comună pe care niciuna dintre entități nu ar reuși să o realizeze în mod individual [14]. Colaborarea se bazează pe interacțiunea dintre procese autonome, ce nu este supervizată de o unitate centrală care supraveghează întregul proces [15].

Prin integrarea unui set de tehnologii, proiectate în acord cu conceptele de mai sus, a apărut conceptul de "Fabrică Inteligentă" (*Smart Factory*), care permite fabricația de produse cu caracteristici avansate, prin utilizarea procedurilor și a proceselor inteligente.

Smart Factory

Conceptul Smart Factory propune o abordare inovatoare care integrează tehnologii moderne de producție, cu potențial de aplicare în diverse domenii industriale. Utilizarea acestei abordări conduce la dezvoltarea sistemelor de producție inteligente, sigure, eficiente și sustenabile din punct de vedere al impactului asupra mediului [16]. Acestea sunt posibile datorită combinării și integrării tehnologiilor avansate în structura dispozitivelor de producție, a sistemelor informatice și de comunicații, a serviciilor diverse, a sistemelor destinate prelucrării datelor, precum și în infrastructura hardware de rețea [17]. În conformitate cu [18], conceptul *Smart Factory* permite dezvoltarea sistemelor de producție adaptabile și flexibile, care vor integra produse și utilaje cu abilități de acțiune autonomă și inteligentă, datorită integrării conceptelor specifice Industriei 4.0, precum *Internet of Everything* sau *Cyber-Physical Systems*.

În literatura de specialitate, o fabrică inteligentă este recunoscută drept una dintre cele mai importante beneficii ale Industriei 4.0, integrând o gamă largă de dispozitive și sub-sisteme industriale pentru a crea un sistem de producție interconectat. Toate dispozitivele industriale integrate în sistemele de fabricație iau decizii în mod autonom, pentru a realiza anumite obiective de producție [14]. O fabrică inteligentă este un sistem integrat care utilizează tehnologii specifice precum printarea 3D, tehnologia RFID, realitate augmentată, ERP, IoT și instrumente de suport al deciziei [16, 19]. Aceste tehnologii pot fi incluse în sub-sisteme dezvoltate pe conceptele inteligenței artificiale, pentru a crește eficiența și productivitatea sistemului [3]. În acest fel, dispozitivele integrate sunt coordonate, cooperează sau colaborează în mod inteligent pentru a atinge obiectivele dorite. Principalele trăsături ale unei fabrici inteligente sunt:

- Conectivitatea: capacitatea entităților implicate în procesul de producție de a se conecta și comunica între ele prin intermediul tehnologiilor de comunicație.
- Optimizarea: reducerea duratelor ciclurilor de producție și îmbunătățirea utilizării resurselor materiale și umane, prin intermediul sistemelor de control și monitorizare, implementate în conducerea proceselor de producție.
- Transparența: utilizarea de noi instrumente pentru susținerea unui proces decizional rapid, consecvent și transparent, precum și pentru urmărirea traseului acestor decizii prin intermediul sistemelor de monitorizare și control.
- Adaptabilitatea dinamică: identificarea timpurie a defectelor de calitate și a anomaliilor, urmată de replanificarea automată în timp real a procesului de producție, prin intermediul sistemelor de monitorizare și control.
- Agilitatea: capacitatea de adaptare rapidă la alți parametri de producție, prin utilizarea echipamentelor adaptive și a sistemelor de monitorizare și control.

Cyber-Physical System (CPS)

Un CPS, definit în [20], este un ansamblu de resurse fizice și cibernetice interconectate care utilizează un control automat inteligent, pentru a îmbunătăți autonomia și eficiența întregului sistem. Elementele componente ale CPS-urilor sunt caracterizate de o strânsă

interacțiune între o componentă cibernetică (software) și una fizică (dispozitivele), ambele fiind esențiale pentru obținerea unui nivel înalt de performanță, robustețe, eficiență și fiabilitate în mediul de producție [21, 22].

Pentru a realiza aceste obiective, tehnologiile de comunicare, automatizarea și inteligența artificială sunt strâns combinate în cadrul CPS-urilor. Din punctul de vedere al serviciilor, un CPS poate fi compus din una sau mai multe componente, sau unități interconectate, în care serviciile prestate de fiecare unitate sunt vizibile și accesibile celorlalte unități ale sistemului, ceea ce permite colaborarea acestora [23]. În ceea ce privește numărul elementelor componente ale unui CPS și conectarea acestora la infrastructura *Cloud*, rezultă aspecte și caracteristici esențiale în definirea arhitecturii IoT. De asemenea, relativ la capacitățile de producție aferente unui CPS, acestea sunt componente esențiale ale Industriei 4.0. Datorită potențialului avansat în îmbunătățirea eficienței și fiabilității întregului sistem, acestea contribuie semnificativ la îndeplinirea obiectivelor de producție. Astfel, un CPS prezintă următoarele caracteristici definitorii [24]:

- Integrare: prin integrarea componentelor fizice și cibernetică ale unui proces, sistemul poate funcționa ca o entitate unitară [25];
- Inteligența: această caracteristică esențială a CPS permite detectarea evenimentelor, interacțiunea, analiza datelor și elaborarea deciziilor pentru adaptarea sistemului la condițiile mediului de lucru [26];
- Virtualizarea: prin crearea unui model digital al întregului lanț de producție, se pot analiza și observa proprietățile și caracteristicile proceselor fizice, obținând astfel o continuitate digitală a datelor [27];
- Cooperare și colaborare: această caracteristică permite sistemelor, în combinație cu funcția de autonomie proprie, să aibă funcții automate de auto-organizare și/sau auto-planificare a sarcinilor [28, 29];
- Predictibilitatea: CPS-urile trebuie să poată anticipa comportamentul sistemului, în special cazurile neașteptate sau cele corespunzătoare apariției erorilor, pentru a garanta funcționarea continuă a tuturor proceselor din sistem [30];
- Reconfigurabilitate și adaptabilitate: integrarea în sistem a diferitelor tehnologii care determină răspunsul dinamic la schimbări și perturbații apărute în timpul funcționării, ceea ce conduce la reconfigurarea și adaptarea sistemului la noile condiții [31].

Internet of Everything

Conceptul *Internet of Things* (IoT), este particularizarea *Internet of Everything* (IoE). Dispozitivele fizice sunt interconectate într-o rețea cu capabilități de intercomunicare [32]. Scopul IoT constă în facilitarea comunicației, în special a comunicației fără fir, între dispozitivele utilizate în mod obișnuit [33]. Această definiție poate fi extinsă pentru a include dispozitive semi-autonome sau autonome, care pot acționa asupra mediului înconjurător pentru a furniza servicii utilizatorilor, indiferent dacă aceștia se află sau nu în apropierea dispozitivelor [34].

În mod similar, compania CISCO definește IoE ca un mediu care creează valoare prin interacțiunea în timp real între entitățile rețelei, incluzând nu numai dispozitive, ci și persoane, date și procese, toate conectate la internet [35]. Alți autori definesc IoE ca fiind internetul care

conectează persoane, date, procese și obiecte, permițând conectivitatea oricând și oriunde pentru a obține sisteme inteligente, orașe inteligente, transporturi inteligente și alte aplicații [36, 37].

Definiția dată de CISCO pentru IoE poate fi extinsă pentru a include și serviciile. În majoritatea cazurilor, în cadrul IoE, serviciile Cloud, de tipul servicii de stocare, servicii de grupare sau servicii de *Cloud computing*, sunt utilizate pentru a extinde capacitățile dispozitivelor fizice [6]. Astfel, în definiția companiei CISCO, serviciile nu sunt incluse în IoE, deoarece acestea nu sunt întotdeauna legate de persoane, procese sau obiecte.

Prin conceptul XaaS, ca nouă paradigmă a *Cloud computing*, un proces poate fi furnizat sub formă de serviciu. Această abordare poate fi extinsă pentru a îmbunătăți definiția pentru *Internet of Everything* (IoE), prin includerea serviciilor ca o nouă dimensiune. Prin urmare, IoE poate fi redefinit ca o rețea interconectată care include următoarele componente:

- Persoane: acestea utilizează dispozitive prin intermediul interfețelor om-mașină, dispozitive mobile sau rețele sociale.
- Date: acestea includ baze de date, date nestructurate sau neprelucrate generate de lucruri, servicii sau persoane.
- Obiecte: acestea reprezintă orice dispozitiv cu capacități de conectare la o rețea, cum ar fi senzori, telefoane, elemente de acționare, mașini inteligente, calculatoare sau altele.
- Servicii: acestea sunt legate de modelul *Anything as a Service* (XaaS) pentru *Cloud computing* și definesc orice serviciu care poate fi accesat prin intermediul unei interfețe web, cum ar fi baze de date (DBaaS), cunoștințe (KaaS), procese legate de afaceri (BPaaS), software (SaaS) și altele.

Cloud Computing

Paradigma *Cloud computing* a fost introdusă ca o metodă nouă, de distribuire a puterii de calcul a dispozitivelor într-o rețea. Această paradigmă este considerată de unii cercetători ca fiind o metodă revoluționară de distribuire a resurselor de calcul, cum ar fi procesarea sau stocarea datelor, precum și a elementelor software sub formă de servicii, într-o rețea care utilizează predominant tehnologii standardizate de internet [38]. În arhitectura de referință propusă de Institutul Național de Standarde și Tehnologie din SUA, *Cloud computing* poate fi împărțit în trei modele de servicii: software ca serviciu - *Software as a service* (SaaS), platformă ca serviciu - *Platform as a service* (PaaS) și infrastructură ca serviciu - *Infrastructure as a service* (IaaS), care permit utilizatorilor să acceseze servicii de software, sisteme de operare, unelte sau elemente hardware prin intermediul internetului [38, 39].

În multe cazuri, modelul Internetului serviciilor - *Internet of services* (IoS) facilitează organizarea aplicațiilor diferite, în servicii interoperabile de procesare a informațiilor și a datelor, furnizate de servicii, surse sau formate. În [39] se consideră că în cadrul IoS, totul poate fi prezentat sub forma de servicii conectate la internet, respectiv: software-ul ca serviciu - SaaS, platforma de rulare a software-ului ca serviciu - PaaS [40] și infrastructura ca serviciu - IaaS. În concluzie, conceptul generalizat „*totul ca serviciu*”-XaaS [41], se referă la punerea la dispoziție a fiecărui element din proces, sub forma unui serviciu, inclusiv produsele finale, uneltele și tehnologiile care vor fi puse la dispoziția utilizatorilor, prin intermediul serviciilor *Cloud*.

Integrarea sistemelor pe verticală și orizontală

Integrarea sistemelor reprezintă procesul de interconectare a tuturor componentelor unui sistem într-un mod operațional coerent, care implică elemente software, hardware și alte sisteme și subsisteme [42]. Componentele interconectate colaborează și interacționează în cadrul diferitelor operații, pentru a dezvolta soluții, în conformitate cu propriile obiective, individuale sau colective [43]. În Industria 4.0, integrarea componentelor și sistemelor este realizată prin intermediul unor tehnologii specifice, precum IoT, astfel încât dispozitivele să poată comunica între ele, să se coordoneze și să colaboreze în cadrul proceselor [32, 44]. Această integrare poate fi realizată prin [5]:

- Integrarea orizontală, care constă în interconectarea și colaborarea între două sau mai multe companii cu scopul de a obține rezultate individuale sau comune [44, 5];
- Integrarea verticală, care se referă la creșterea nivelului de integrare a dispozitivelor de producție și a diferitelor niveluri ierarhice ale unei companii, cu scopul de a spori comunicarea și eficiența. Acest tip de integrare conduce la o creștere a nivelului de cooperare, coordonare și colaborare între elementele hardware, software și umane ale unei companii [5, 44].
- Integrarea *end-to-end*, care reprezintă interconectarea mediului virtual cu cel real, oferind posibilitatea entităților din mediul real de a interacționa cu elemente ale sistemului aflate în spațiul cibernetic. Prin intermediul acestei integrări, dispozitivele pot trimite date către *Cloud*, iar operatorii pot interacționa cu sistemul prin intermediul interfețelor om-mașină.

Integrarea sistemelor poate fi realizată prin aplicarea acestor concepte la diferite niveluri ale unei companii, astfel încât să se optimizeze operațiile și să se îmbunătățească eficiența. Unul dintre conceptele utilizate este conceptul "5C", menționat la începutul acestui subcapitol. Acest concept propune structurarea proceselor pe niveluri de integrare, astfel încât rezolvarea problemelor să adreseze nivelurile locale, cu asigurarea funcționării corecte a întregului sistem. De exemplu, problemele legate de interconectare trebuie rezolvate la primul nivel, însă odată ce aceste probleme sunt rezolvate, se va stabili un protocol de comunicare și se vor elabora soluții pentru eventuale probleme care pot apărea. După rezolvarea problemelor legate de conectare și comunicare, se vor adresa nivelurile de coordonare, colaborare și cooperare, care depind de nevoile specifice de integrare ale sistemului de fabricație. Coordonarea la nivelul unui sistem va favoriza integrarea pe verticală, în timp ce colaborarea și cooperarea vor permite interacțiuni atât pe verticală, cât și pe orizontală. Este important să se identifice și să se abordeze aceste probleme de integrare, pentru a asigura o operare eficientă a sistemului în ansamblu.

Concepte și tehnologii specifice Industriei 5.0, integrate în procesele de fabricație flexibilă

Într-o lume aflată în continuă evoluție industrială, Industria 5.0 a apărut ca reacție de complementaritate în raport cu sistemele dezvoltate pe conceptele 4.0, propunând o mai bună integrare a omului în procesele industriale. Conceptul Industria 5.0, introdus în anul 2020 de către Comisia Europeană [45] reprezintă o nouă evoluție industrială, care propune o viziune modificată pentru modul în care este abordat generic procesul industrial, implicit sistemul de fabricație.

La baza acestei noi evoluții industriale se află conceptele: centrarea pe om, sustenabilitatea și reziliența. Ideea de bază, în abordările Industriei 5.0, constă în selectarea tehnologiilor în coordonare cu un raționament etic, relativ la modul în care aceste tehnologii susțin valorile și nevoile umane. Noile concepte abandonează abordările „reci” ale Industriei 4.0, în care sunt esențiale aspectele pur tehnice, sau pur economice. Noile tehnologii, precum interfețele om-mașină, îmbinarea capacităților creierului uman cu inteligența artificială, colaborarea omului cu roboți și mașini, sunt folosite pentru a genera produse și servicii. Aceste produse și servicii pot fi personalizate în continuare, în acord cu nevoile clienților, și reduc impactul industriei asupra mediului. Mai mult, acestea permit aplicarea unor concepte ecologice precum autosuficiența energetică, neutralitatea emisiilor sau economia circulară [46].

Pentru o dezvoltare sustenabilă, se vor proiecta procese circulare care reutilizează și reciclează resursele naturale, reduc deșeurile și impactul asupra mediului. Sustenabilitatea înseamnă reducerea consumului de energie și a emisiilor cu efect de seră, pentru a evita epuizarea și degradarea resurselor naturale. Anumite tehnologii, precum inteligența artificială și fabricarea aditivă, pot juca un rol important în optimizarea eficienței resurselor și minimizarea deșeurilor.

Reziliența se referă la dezvoltarea proceselor industriale cu grad mare de robustețe, cu adaptare mai bună la rejectarea perturbațiilor, și cu capacitate de adaptare dinamică la situații critice, în sensul comutării pe o infrastructură alternativă, prevăzută pentru perioade de criză. Schimbările geopolitice și crizele naturale, cum ar fi pandemia de Covid-19, evidențiază fragilitatea abordării actuale a producției globalizate. Strategiile viitorului ar trebuie să considere dezvoltarea lanțurilor valorice strategice suficient de rezistente, a capacității de producție adaptabile și a proceselor flexibile, în special acolo unde lanțurile valorice servesc nevoilor umane de bază [47].

În realizarea acestor concepte sunt necesare sisteme complexe ce combină tehnologiile Industriilor 4.0 și 5.0 precum [46]:

- Interacțiunea om-mașină individualizată conectează omul cu sistemele tehnologice sau combină inovația umană cu capabilitățile mașinilor. Acest lucru se realizează prin:
 - recunoașterea vocală, a gesturilor, precum și predicția intenției umane;
 - tehnologii de urmărire a efortului mental și fizic, și a stresului angajaților;
 - roboți colaborativi („coboți”), care lucrează împreună cu oamenii;
 - tehnologii augmentate, virtuale sau de realitate mixtă, cu scop de diseminare virtuală a informației, combinat cu cel de formare;
 - îmbunătățirea capacităților fizice umane: exoschelete, echipamente de lucru inspirate biologic și echipamente de siguranță;
 - îmbunătățirea capacităților cognitive umane: tehnologii de sinergie între inteligența artificială și abilitățile cognitive umane (de exemplu, combinarea creativității cu abilitățile analitice), sisteme de sprijinire a deciziilor.
- Tehnologiile bio-inspirate și materiale inteligente decurg din conceptul de transformare biologică și pot fi asimilate, de exemplu, cu următoarele proprietăți:
 - auto-vindecare sau auto-reparare a materialelor;

-
- greutate redusă;
 - reciclabilitate;
 - generarea de materii prime din deșeuri;
 - integrarea materialelor biologice;
 - tehnologii de senzori și biosenzori încorporați;
 - ergonomie adaptivă/reactivă ;
 - materiale cu trasabilitate intrinsecă.
- *Digital twin* și tehnologiile de simulare, optimizează producția, testează produsele și procesele și detectează posibile efecte dăunătoare, de exemplu:
- *digital twin* ca alternativă de reprezentare digitală pentru produse și procese;
 - simularea și testarea virtuală a produselor și proceselor (de exemplu, pentru procese centrate pe om, se testează siguranța de lucru și operațională);
 - modelare și simulare dinamică;
 - simularea și măsurarea impactului social și de mediu;
 - sisteme ciber-fizice și *digital twin* ale sistemelor;
 - întreținere planificată.
- Tehnologii de transmitere, stocare și analiză a datelor, bazate pe entități și proprietăți specifice:
- senzori în rețea;
 - interoperabilitatea datelor și a sistemului;
 - securitate cibernetică scalabilă, pentru mai multe niveluri;
 - securitate cibernetică/infrastructură IT *Cloud* sigură;
 - managementul *Big Data*;
 - trasabilitatea (de exemplu, originea datelor și îndeplinirea specificațiilor);
 - prelucrarea datelor pentru procesele de învățare.
- Inteligența artificială, dezvoltată în diferite direcții:
- inteligența artificială bazată pe cauzalitate și nu numai pe corelație;
 - abilitatea de a răspunde la condiții noi sau neașteptate fără sprijin uman;
 - interfețe creier-mașină;
 - inteligență artificială individuală, centrată pe persoană;
 - învățare profundă informată (cunoștințe de specialitate combinate cu inteligență artificială);
 - inteligență artificială sigură și eficientă din punct de vedere energetic;

- abilitatea de a gestiona și de a găsi corelații între date complexe, interconectate, de diferite origini și dimensiuni, în sisteme dinamice generate dintr-un complex de sisteme.
- Tehnologii pentru eficiența energetică, surse regenerabile, stocare și autonomie, următoarele tehnologii și proprietăți fiind necesare pentru a obține neutralitatea emisiilor:
 - Integrarea surselor regenerabile de energie;
 - Suport pentru tehnologiile cu hidrogen și *Power-to-X*;
 - Senzori inteligenți;
 - Transmiterea datelor cu energie redusă și analiza datelor.

Obiectivele cercetării și evaluarea sistematică a rezultatelor

Obiectivele propuse pentru acest proiect de cercetare, urmăresc proiectarea și implementarea unor tehnici de adaptare a unei linii de producție de la un sistem destinat fabricației în flux, la un sistem pentru fabricația flexibilă, cu integrarea conceptelor *Industriilor 4.0 și 5.0*. În acest sens, următoarele obiective specifice au fost identificate:

OB.1. Proiectarea hardware și a tehnicilor de adaptare a unei linii de producție dedicată fabricației în flux, la un sistem integrat pentru fabricația flexibilă, cu integrarea conceptelor *Industriilor 4.0 și 5.0*, cu următoarele sub-obiective:

OB.1.1. Proiectarea tehnicilor de adaptare hardware, a unei linii pentru fabricația în flux, la linie dedicată fabricației flexibile, cu aplicarea conceptelor Industriei 4.0 și 5.0 ;

OB.1.2. Proiectarea structurii hardware a sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, dedicat asamblării flexibile în flux și în celulă, cu aplicarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0;

OB.1.3. Evaluarea rezultatelor cercetărilor pentru atingerea obiectivului OB.1.

OB.2. Modelarea și implementarea conducerii sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, subordonate conceptelor *Industriilor 4.0 și 5.0*, cu accent pe *IoT și Digital twin*, cu următoarele sub-obiective:

OB.2.1. Modelarea cu Rețele Petri Temporizate (RPT) a conducerii sistemului integrat cu două fluxuri paralele: fabricație flexibilă pe linie și fabricație flexibilă în celulă, cu aplicarea conceptului *Digital twin*;

OB.2.2. Implementarea structurii de conducere a sistemului integrat pentru fabricația/asamblarea flexibilă, testarea calității și dezasamblare a produselor, cu integrarea conceptului *IoT*;

OB.2.3. Modelarea cu Rețele Petri Sincronizate (RPS) a conducerii fabricației flexibile din stațiile sistemului integrat, și a structurii de achiziție și prelucrare a datelor din proces, cu aplicarea conceptului *Digital twin*.

OB.2.4. Evaluarea rezultatelor cercetărilor pentru atingerea obiectivului OB.2

OB.3. Conducerea automată a sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, pentru realizarea operațiilor de transport, poziționare și compensare a perturbațiilor în stații, și integrarea conceptelor *Industriilor 4.0 și 5.0*

OB.3.1. Modelarea fabricației și a perturbațiilor din stațiile de lucru;

OB.3.2. Implementarea structurii de conducere automată pentru realizarea transportului în stații, poziționarea la punctul de lucru și compensarea perturbațiilor, cu aplicarea conceptelor *Industriilor 4.0 și 5.0*;

OB.3.3. Evaluarea rezultatelor cercetărilor pentru atingerea obiectivului OB.3.

OB.4. Proiectarea planificării optimale a fabricației hibride, pe o linie cu fluxuri paralele de producție, cu următoarele sub-obiective:

OB.4.1. Proiectarea unui algoritm de planificare distribuită a task-urilor de producție, pentru un sistem integrat cu două fluxuri de lucru paralele;

OB.4.2. Adaptarea algoritmului la planificare optimă a fabricației, pentru sistemul de laborator pentru fabricația flexibilă;

OB.4.3. Evaluarea rezultatelor cercetărilor pentru atingerea obiectivului OB.4.

OB.5. Implementarea algoritmului de planificare optimă a fabricației hibride pe ISFM, cu integrarea conceptelor *Industriilor 4.0 și 5.0*:

OB.5.1. Implementarea, testarea și evaluarea rezultatelor planificării optimale, a fabricației. Studiu de caz;

OB.5.2. Proiectarea și implementarea unei platforme software care, realizează interfața între algoritmul de planificare optimă a fabricației și preluarea în timp-real a comenzilor de producție;

OB.5.3. Evaluarea rezultatelor cercetărilor pentru atingerea obiectivului OB.5.

Structura tezei pe capitole

În această lucrare, cercetările s-au concentrat pe proiectarea și implementarea tehnicilor de adaptare a liniilor de producție destinate fabricației în flux, la sisteme integrate pentru fabricația flexibilă cu integrarea conceptelor *Industriilor 4.0 și 5.0* pentru o conducere eficientă.

În primul capitol sunt prezentate noțiunile fundamentale pentru sisteme de producție dedicate fabricației în flux, precum și aspecte specifice ale fabricației de laborator, în abordare conexă cu *Industriile 4.0 și 5.0*. În plus, sunt prezentate cele două subsisteme obținute prin proiectarea proceselor de fabricație flexibilă în flux, și fabricație flexibilă în celulă. De asemenea, este descrisă structura hardware a sistemului care integrează unitar cele două structuri pentru fabricația flexibilă, obținute în urma proiectării.

În Capitolul 2, se propune modelarea cu RPS, a dinamicii sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, aplicând conceptele *IoT și Digital twin*, și a stațiilor de lucru. Mai mult, sunt prezentate modelele RPS ale procesului de fabricație din cele 6 stații implicate în procesul de asamblare.

Capitolul 3 se concentrează asupra proiectării și implementării unei structuri de conducere cu PID, a operațiilor de transport și poziționare precisă, cu compensarea perturbațiilor, pentru stațiile de lucru. Este propusă o variantă a algoritmului de conducere cu

structură PID convențională, precum și un algoritm PID bazat pe evenimente (PID_E). Pentru validarea structurii de conducere, se efectuează simulări ale controlului automat al transportului și poziționării precise, cu compensarea perturbațiilor. În final se realizează implementarea conducerii automate, cu aplicarea conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0..

În Capitolul 4, se prezintă proiectarea unui algoritm de planificare optimă a sarcinilor de producție, pentru un sistem integrat pentru fabricația flexibilă, cu două fluxuri paralele de producție. De asemenea, sunt detaliate particularizările ale acestui algoritm pentru sistemul de laborator pentru fabricația flexibilă. Algoritmul este validat prin simulări ale sarcinilor distribuite pe cele două fluxuri, pe baza rezultatelor furnizate de planificarea optimă, testată pe scenarii de producție.

Capitolul 5 este dedicat implementării algoritmului de planificare optimă cu colectarea datelor de fabricație printr-o platformă software unitară de tip Client-Server. Platforma asigură, prin serverul *Cloud*, interfața dinamică între algoritmul de planificare optimă a fabricației și preluarea în timp-real a sarcinilor și comenzilor de producție. Se evidențiază aspecte ale conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0, care se regăsesc în implementare.

Capitolul 6 oferă o prezentare sintetică privind concluziile și contribuțiile științifice, pe care le adjudecăm în raport cu tema și obiectivele propuse. În plus, sunt prezentate direcțiile viitoare de cercetare, prin care se pot continua cercetările dezvoltate în teză, relativ la noi tehnologii pentru fabricația flexibilă. În final, se cuantifică câștigul oferit de soluțiile pentru îmbunătățirea planificării, optimizarea producției, și implementarea extinsă a conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0. Diseminarea rezultatelor de cercetare obținute, reprezintă validarea conceptelor originale și a noilor tehnologii prezentate în Teză, de către comunitatea științifică din domeniu.

Introduction

In recent years, interest in the new industrial revolution, called Industry 4.0, has grown significantly. This revolution integrates a set of advanced concepts - Smart Factory, Big Data, Augmented Reality, Cyber-Physical Systems, Internet of things (IoT) and Internet of Everything (IoE), which bring radical changes in the hardware structure of systems but and in the structure of control architectures. Industry 4.0 represents a major challenge, especially from the perspective of the diversity of actors involved in the Internet of Things. In this context, it is important to know the stages of industrial evolution, as well as the main concepts underlying Industry 4.0.

The concepts of Industry 4.0 are the basis for the development of the next stage of industrial evolution, Industry 5.0, which is rather complementary to the concepts of 4.0. Industry 5.0 brings the human factor back into the equation of industrial ecosystems, promoting the integration of the operator at the center of industrial processes. This evolution focuses on aspects of sustainability, ethics, diversity and low environmental impact, proposing a complete paradigm shift. Thus, it is proposed to move from the "cold" world of technology, data, ecosystems and machines, oriented towards increasing productivity and reducing costs, to a holistic development, which aims to return labor to factories, increase human-machine interoperability, production distributed, hyper-personalization, the reintegration of the human, social and environmental dimension into the reality of the economic world.

Stages of the industrial evolution up to Industry 4.0

Since ancient times, all significant production activities - agriculture, transport or textile production - were carried out by manual labor. This production method required a long process of product development and improvement, mainly achieved through successive trials, with the aim of eliminating errors. An important event in the history of industrialization was represented by the first industrial revolution, also called Industry 1.0.

The first industrial revolution took place in the second half of the 18th century and lasted until the middle of the 19th century. This revolution was influenced by the advent of the water pump and the steam engine, which enabled the mechanization of production processes and the transformation of manual production systems into manufacturing systems [1, 2]. The use of steam engines enabled the extraction and production of goods in a much shorter time.

The second industrial revolution, known as Industry 2.0, started at the end of the 19th century and lasted until the beginning of the 20th century [1, 3]. This stage of transformation was influenced by the advent of electricity and the development of the division of labor [2, 4]. These elements allowed the manufacture of products on production lines. In addition, this development led to the advent of the internal combustion engine and the discovery of new sources of energy such as electricity and fossil fuels, as well as the emergence of new means of transportation.

Between the 1960s and the beginning of the 21st century [2], the third major stage in the evolution of production took place, called Industry 3.0. This industrial revolution, also known as the digital revolution [1], sought to use information technology and electronic circuits to increase productivity and improve production processes [4, 2, 1]. In this phase of the industrial revolution, the use of programmable logic circuits, together with industrial automation, allowed the development of new production technologies, which led to a significant increase in the

ability to develop products and services, as well as to partially reduce errors in production environment.

Industry 3.0 has also facilitated the development and implementation of greener energy sources and means of production and transport. The widespread use of information technology has also enabled the emergence and use of intelligent technologies, leading to greater efficiency in production processes.

Concepts and technologies specific to Industry 4.0 integrated into flexible manufacturing processes

The concept of Industry 4.0 was introduced at the Hanover Trade Fair in 2011, although some sources claim that the fourth industrial revolution began at the beginning of the 21st century. According to the specialized literature, this industrial evolution is characterized by the integration of artificial intelligence in the production processes, but in general it is considered as having as its main purpose the increase of the level of efficiency and productivity within the production systems [5].

To achieve the desired level of efficiency and productivity of production systems, a number of new technologies have been implemented, including Augmented Reality, Big Data analysis, Cyber-Physical Systems, Cloud Computing and the Internet of Everything, among others. All these technologies are used to reconfigure production systems in models with hierarchical structure, called 5C [6]. This hierarchical model includes the following levels:

- **Connectivity:** it is represented by the coupling of equipment and IoT-type entities to a network and the use of a common communication system [7]. As also presented in [3], this allows entities to initiate a first contact, in the sense of validating the communication potential, followed by actual communication;
- **Communication:** from the moment entities are connected, they can transmit messages in order to exchange information or to establish interactions [8]. This communication means that both entities can "understand" the transmitted information [9]. These two levels, Connection and Communication, are essential in achieving interoperability, but also in coordination, cooperation and collaboration between various processes;
- **Coordination:** it is carried out by a central entity that ensures the coherent execution of the tasks of a system, based on predetermined criteria [10]. This coordination is determined by the vertical integration of processes, so that production systems are effectively interconnected with decision-making levels [11];
- **Cooperation:** it is represented by the possibility of negotiation between various inter-systemic or intra-systemic entities to achieve a certain task [12]. This allows the achievement of several tasks simultaneously, through informational cooperation between entities, according to predetermined objectives [13];
- **Collaboration:** it is represented by entities from at least two systems that work together to achieve a common task that none of the entities would be able to achieve individually [14]. Collaboration is based on the interaction between autonomous processes, which is not supervised by a central unit that oversees the entire process [15].

By integrating a set of technologies, designed in accordance with the above concepts, the concept of the "Smart Factory" emerged, which allows the production of products with advanced features, through the use of intelligent procedures and processes.

Smart Factory

The Smart Factory concept denotes an innovative approach that integrates modern production technologies, with the potential for application in various industrial fields. Using this approach leads to the development of intelligent, safe, efficient and sustainable production systems in terms of environmental impact [16]. This is possible due to the combination and integration of advanced technologies in the structure of production devices, communication and information systems, various services, systems for data processing, as well as in the network hardware infrastructure [17]. According to [18], the Smart Factory concept allows the development of adaptable and flexible production systems that will integrate products and machines with autonomous and intelligent action abilities, thanks to the integration of Industry 4.0 specific concepts, such as the Internet of Everything or Cyber-Physical Systems.

In the specialized literature, a smart factory is recognized as one of the most important benefits of Industry 4.0, integrating a diverse range of industrial devices and sub-systems to create an interconnected production system. All industrial devices integrated into manufacturing systems make decisions autonomously to achieve certain production objectives [14]. A smart factory is an integrated system that uses specific technologies such as 3D printing, RFID technology, augmented reality, ERP, IoT and decision support tools [16, 19]. These technologies can be included in sub-systems developed on the concepts of artificial intelligence, to increase the efficiency and productivity of the system [3]. In this way, integrated devices are intelligently coordinated, cooperate or collaborate to achieve the desired goals. The main features of a smart factory include:

- **Connectivity:** the ability of entities involved in the production process to connect and communicate with each other through communication technologies;
- **Optimization:** reducing the duration of production cycles and improving the use of material and human resources, through the control and monitoring systems implemented in the management of production processes;
- **Transparency:** the use of new tools to support a fast, consistent and transparent decision-making process, as well as to follow the path of these decisions through monitoring and control systems;
- **Dynamic adaptability:** early identification of quality defects and anomalies, followed by real-time automatic replanning of the production process through monitoring and control systems;
- **Agility:** the ability to quickly adapt to other production parameters, through the use of adaptive equipment and monitoring and control systems.

Cyber-Physical System (CPS)

A CPS is defined in [20] as a set of interconnected physical and cyber resources that use intelligent control to improve the autonomy and efficiency of the entire system. The components of CPS are characterized by a close interaction between a cybernetic component (software) and a physical one (devices), both of which are essential for obtaining a high level of performance, robustness, efficiency and reliability in the production environment [21, 22].

To achieve these goals, communication, automation and artificial intelligence technologies are closely combined within CPSs. From the point of view of services, a CPS can be defined as composed of one or more components, or interconnected units, where the services provided by each unit are visible and accessible to the other units of the system, which allows their collaboration [23]. Regarding the number of component elements of a CPS and their connection to the Cloud infrastructure, essential aspects and characteristics result in defining the IoT architecture. Also, relative to the production capabilities of a CPS, they are essential components of Industry 4.0. Due to the advanced potential in improving the efficiency and reliability of the entire system, they contribute significantly to the achievement of production goals. Thus, a CPS presents the following defining characteristics [24]:

- Integration: by integrating the physical and cyber components of a process, the system can function as a unitary entity [25];
- Intelligence: this essential feature of the CPS allows event detection, interaction, data analysis and decision-making to adapt the system to the conditions of the work environment [26];
- Virtualization: by creating a digital model of the entire production chain, the properties and characteristics of physical processes can be analyzed and observed, thus obtaining a digital continuity of data [27];
- Cooperation and collaboration: this characteristic allows systems, in combination with the function of self-autonomy, to have automatic functions of self-organization and/or self-planning of tasks [28, 29];
- Predictability: CPSs must be able to anticipate the behavior of the system, especially unexpected cases or those corresponding to the occurrence of errors, to guarantee the continuous operation of all processes in the system [30];
- Reconfigurability and adaptability: the integration into the system of various technologies that determine the dynamic response to changes and disturbances occurring during operation, which leads to the reconfiguration and adaptation of the system to new conditions [31].

Internet of Everything

Within the Internet of Things (IoT) concept, as a specialization of the Internet of Everything (IoE), physical devices are interconnected in a network with intercommunication capabilities [32]. The purpose of IoT is to facilitate communication, especially wireless communication, between commonly used devices [33]. This definition can be extended to include semi-autonomous or autonomous devices that can act on the environment to provide services to users, whether or not they are near the devices [34].

Similarly, the CISCO company defines IoE as an environment that creates value through real-time interaction between network entities, including not only devices, but also people, data and processes, all connected to the Internet [35]. Other authors define the IoE as the Internet that connects people, data, processes, and objects, enabling anytime, anywhere connectivity to achieve smart systems, smart cities, smart transportation, and other applications [36, 37].

CISCO's definition of IoE can be extended to include services. In most cases, within the IoE, Cloud services, such as storage services, clustering services or Cloud computing services, are used to extend the capabilities of physical devices [6]. Thus, in CISCO's

definition, services are not included in IoE because they are not always related to people, processes or objects.

Through the concept of XaaS within the Cloud-Computing paradigm, a process can be provided as a service. This paradigm can be extended to improve the definition for the Internet of Everything (IoE) by including services as a new dimension. Therefore, the IoE can be redefined as an interconnected network that includes the following components:

- People: they use devices through human-machine interfaces, mobile devices or social networks;
- Data: this includes databases, unstructured or unprocessed data generated by things, services or people;
- Objects: These represent any device with network connectivity capabilities, such as sensors, phones, actuators, smart machines, computers or others;
- Services: these are related to the Anything as a Service (XaaS) model for Cloud-computing and define any service that can be accessed through a web interface, such as database (DBaaS), knowledge (KaaS), related processes business (BPaaS), software (SaaS) and others.

Cloud Computing

The Cloud Computing paradigm was introduced as a new method of distributing the computing power of devices in a network. This paradigm is considered by some researchers to be a revolutionary method of distributing computing resources, such as data processing or storage, as well as software elements as services, in a network that predominantly uses standardized Internet technologies [38]. In the reference architecture proposed by the US National Institute of Standards and Technology, Cloud Computing can be divided into three service models: Software as a service (SaaS), Platform as a service (PaaS) and Infrastructure as a service (IaaS), which allow users to access software services, operating systems, tools or hardware elements via the Internet [38, 39].

In many cases, the Internet of service (IoS) model facilitates the organization of different applications into interoperable services and facilitates the processing of information and data from various services, sources or formats. In [39] it is considered that within the IoS, everything can be presented as services using the Internet, including software as a service - SaaS, platform running software as a service - PaaS [40] and infrastructure as a service - IaaS. Therefore, in this direction, everything-as-a-service-XaaS [41] refers to making available every element of a process as a service, including end products, tools and technologies that can be made available to users through services Cloud.

Vertical and horizontal system integration

Systems integration is the process of interconnecting all components of a system in a coherent operational way, involving software, hardware and other systems and subsystems [42]. These interconnected components collaborate and interact within various operations to develop solutions that are in line with their own goals, either individually or collectively [43]. In the era of Industry 4.0, the integration of components and systems is achieved through specific technologies, such as IoT, so that devices can communicate with each other, coordinate and collaborate in various processes [32, 44]. This integration can be achieved in three main ways [5]:

- Horizontal integration, which consists of the interconnection and collaboration between two or more companies with the aim of obtaining individual or joint results [44, 5];
- Vertical integration, which refers to increasing the level of integration of production devices and different hierarchical levels of a company in order to increase communication and efficiency. This type of integration leads to an increase in the level of cooperation, coordination and collaboration between the hardware, software and human elements of a company [5, 44];
- End-to-end integration, which represents the interconnection of the virtual environment with the real one, offering the possibility for entities from the real environment to interact with elements of the system located in cyberspace. Through this integration, devices can send data to the Cloud and operators can interact with the system through human-machine interfaces.

This integration can be achieved by applying these concepts at different levels of a company so as to optimize operations and improve system efficiency. One of the concepts used for this purpose is that of "5C", mentioned at the beginning of this subchapter. This concept describes the different levels of integration within a system and emphasizes the importance of solving problems that occur at each level to ensure the proper functioning of the entire system. For example, interconnection issues need to be resolved at the first level, and once these issues are resolved, a communication protocol needs to be established and solutions developed for any issues that may arise. After solving the problems of connection and communication, there is the level of coordination, collaboration and cooperation, which depends on the specific integration needs of the manufacturing system. Coordination at the level of a system will favor vertical integration, while collaboration and cooperation will enable interactions both vertically and horizontally. It is important to identify and address these integration issues to ensure efficient and productive operation of the system as a whole.

Concepts and technologies specific to Industry 5.0 integrated into flexible manufacturing processes

In a world in continuous industrial evolution, Industry 5.0 emerged as a complementary reaction in relation to systems developed on 4.0 concepts, proposing a better integration of humans in industrial processes. The concept of Industry 5.0, introduced in 2020 by the European Commission [45] represents a new industrial evolution, which proposes a modified vision for the way we generically look at the industrial process, implicitly the manufacturing system.

At the heart of this new industrial evolution are three main concepts: human-centeredness, sustainability and resilience. The basic idea in Industry 5.0 approaches is to select technologies based on an ethical reasoning of how these technologies support human values and needs. The new concepts abandon the "cold" approaches of Industry 4.0, in which purely technical or purely economic aspects are essential. New technologies, such as human-machine interfaces, merging human brain capabilities with artificial intelligence, human collaboration with robots and machines, are used to generate products and services. These products and services can be further customized according to customer needs, reduce the impact of industry on the environment and allow the application of ecological concepts such as energy self-sufficiency, neutrality of emissions or circular economy [46].

In the realization of these concepts, complex systems that combine Industry 4.0 and 5.0 technologies are needed, such as [46]:

- Individualized human-machine interaction, to connect humans with technological systems, help them in different situations or combine human innovation with machine capabilities. This is achieved by:
 - voice and gesture recognition, as well as prediction of human intent;
 - technologies for tracking the mental and physical effort and stress of employees;
 - collaborative robots ("cobots") that work together with humans;
 - augmented, mixed or virtual reality technologies, with the aim of virtual information dissemination combined with training;
 - improving human physical capabilities: exoskeletons, biologically inspired work equipment and safety equipment;
 - improving human cognitive capabilities: technologies of synergy between artificial intelligence and human cognitive abilities (for example, combining creativity with analytical abilities), decision support systems.
- Bio-inspired technologies and smart materials, arising from the concept of biological transformation can be assimilated, for example, with the following properties:
 - self-repairing or self-healing of materials;
 - low weight;
 - recyclability;
 - generation of raw materials from waste;
 - integration of biological materials;
 - embedded sensor and biosensor technologies;
 - adaptive/reactive ergonomics;
 - materials possessing inherent traceability.
- Digital twin and simulation technologies, optimize production, test products and processes and detect possible harmful effects, for example:
 - digital twin as an alternative digital representation for products and processes;
 - simulating and testing products and processes virtually (such as for human-centeredness, work safety, and operational safety);
 - dynamic modeling and simulation;
 - simulating and measuring the social and environmental impact;
 - cyber-physical and digital twin systems that replicate entire systems;
 - planned maintenance.

-
- Data transmission, storage and analysis technologies, with properties such as:
 - sensors in the network;
 - the ability of data and systems to interoperate;
 - cybersecurity that can be scaled for multiple levels;
 - security measures for IT cloud infrastructure;
 - Big Data management;
 - traceability (eg origin of data and compliance with specifications);
 - processing data for the purpose of learning.
 - Artificial intelligence, developed in different directions:
 - artificial intelligence based on causality and not only on correlation;
 - the capability to react to novel or unforeseen circumstances without human assistance;
 - brain-machine interfaces;
 - artificial intelligence that is centered around the individual and person-specific;
 - deep learning that is informed by specialist knowledge in conjunction with artificial intelligence;
 - artificial intelligence that is both safe and energy-efficient;
 - the ability to manage and find correlations between complex, interconnected data of different origins and scales, in dynamic systems generated from a system.
 - Technologies for energy efficiency, renewable sources, storage and autonomy, the following technologies and properties being necessary to achieve neutrality of emissions:
 - the incorporation of renewable energy sources into a system or infrastructure;
 - aiding the development and implementation of hydrogen and Power-to-X technologies;
 - intelligent sensors;
 - data transmission and analysis with low energy consumption.

Research objectives and systematic evaluation of results

The objectives proposed for this research project aim at the design and implementation of techniques for adapting a production line from a system intended for flow manufacturing to a system for flexible manufacturing, with the integration of Industry 4.0 and 5.0 concepts. In this sense, the following specific objectives have been identified:

-
- OB.1.** Hardware design and adaptation techniques of a production line dedicated to flow manufacturing to an integrated system for flexible manufacturing, with the integration of Industry 4.0 and 5.0 concepts, with the following sub-objectives:
- OB.1.1. Designing the hardware adaptation technology of a line for flow manufacturing, to a line dedicated to flexible manufacturing, with the application of Industry 4.0 and 5.0 concepts;
 - OB.1.2. The design of the hardware structure of the integrated system for flexible manufacturing, dedicated to flexible assembly in line and in the cell, with the application of Industry 4.0 and 5.0 concepts;
 - OB.1.3. Evaluation of research results to achieve objective OB.1.
- OB.2.** Modeling and implementation of the management of the integrated system for flexible manufacturing, subordinated to the concepts of Industry 4.0 and 5.0, with an emphasis on IoT and Digital twin, with the following sub-objectives:
- OB.2.1. Timed Petri Nets (RPT) control modeling of the integrated system with two parallel production flows: flexible manufacturing on the line and flexible manufacturing in the cell, with the application of the Digital twin concept;
 - OB.2.2. Implementation of the management structure of the integrated system for flexible manufacturing/assembly, quality testing and product disassembly, with the integration of the IoT concept;
 - OB.2.3. Modeling with Synchronized Petri Nets (RPS) of flexible manufacturing management from integrated system stations, and of process data retrieval/processing structure, applying the Digital twin concept;
 - OB.2.4. Evaluation of research results to achieve objective OB.2.
- OB.3.** Transport control on the integrated system for flexible manufacturing, for carrying out transport, positioning and disturbance compensation operations at station level, with the integration of Industry 4.0 and 5.0 concepts
- OB.3.1. Process and disturbance modeling at a workstation level;
 - OB.3.2. Implementation of the automated driving structure for carrying out transport in stations, positioning at the work point and compensating disturbances, by applying Industry 4.0 and 5.0 concepts;
 - OB.3.3. Evaluation of research results to achieve objective OB.3.
- OB.4.** Designing the optimal planning of multiple manufacturing, on a line with two parallel production flows, with the following sub-objectives:
- OB.4.1. Designing an algorithm for distributing production tasks for an integrated system with two parallel workflows;
 - OB.4.2. Adaptation of the optimized manufacturing planning algorithm for the integrated flexible manufacturing system, laboratory;

OB.4.3. Evaluation of research results to achieve objective OB.4.

OB.5. Implementation of the manufacturing optimal planning algorithm in an integrated system based on Industry 4.0 and 5.0 concepts

OB.5.1. Implementation, testing and evaluation of algorithm results. Case studies;

OB.5.2. The design and implementation of a software platform that ensures, through the Cloud server, the interface between the optimized manufacturing planning algorithm on two parallel flows and the real-time takeover of production orders;

OB.5.3. Evaluation of research results to achieve objective OB.5.

The structure of the thesis by chapters

In this work, the research focused on the design and implementation of technology to adapt production lines for flow manufacturing to integrated systems for flexible manufacturing with the integration of Industry 4.0 and 5.0 concepts for efficient management.

In the first chapter of the work, the fundamental notions related to production systems dedicated to flow manufacturing are presented, as well as specific aspects of the linear manufacturing process customized on a laboratory manufacturing line, in a related approach to the concepts of Industry 4.0 and 5.0. In addition, the two subsystems obtained through process design are presented: flexible manufacturing in flow and flexible manufacturing in the cell. Also, the hardware structure of the system that integrates the two flexible manufacturing structures, obtained as a result of the design, is described.

In Chapter 2, it is proposed to model the dynamics of the integrated system of flexible manufacturing, applying concepts of IoT and Digital twin, which involves the synchronized operation of the two parallel production flows, as well as the modeling of station-level management of flexible manufacturing. Moreover, the RPS models of the manufacturing process of the 6 stations involved in the assembly process are presented.

Chapter 3 focuses on the design and implementation of a control structure, based on the PID control algorithm, used to realize transport, positioning and compensation of process disturbances at the workstation level, highlighting the concepts of Industry 4.0 and 5.0. A variant of the conventional PID regulator control algorithm is proposed, as well as an event-based PID algorithm (PID_E). To validate the driving structure, it is proposed to carry out simulations of transport and positioning at the work point, with disturbance compensation, followed by the implementation of proposed control algorithm.

In Chapter 4, is presented the design of an algorithm for optimal planning of production tasks, within an integrated flexible manufacturing system, with simultaneous manufacturing on two production streams. The details of customizing this algorithm on the integrated flexible laboratory manufacturing system are also presented. The algorithm is validated by simulations of distributed tasks on the two parallel manufacturing systems, provided by the optimal planning algorithm, according to some production scenarios.

Chapter 5 is dedicated to the implementation of the optimal planning algorithm with the collection of manufacturing data through a unitary Client-Server software platform. The platform provides, through the Cloud server, the dynamic interface between the optimal

manufacturing planning algorithm and the real-time takeover of production tasks/orders, being developed by integrating Industry 4.0 and 5.0 concepts.

Chapter 6 provides a synthetic presentation of the conclusions and original scientific contributions, which we judge in relation to the proposed theme and objectives. In addition, future research directions are presented, which will be crucial in continuing the research initiated and developed in the thesis, relative to new flexible manufacturing techniques. Finally, it quantifies the gain offered by solutions for improving planning and optimizing production, and the extensive implementation of Industry 4.0 and 5.0 concepts. Dissemination of the obtained research results represents the validation of original concepts, as well as new techniques, by the scientific community.

Tehnici de adaptare a liniilor pentru fabricația în flux, la sisteme integrate pentru fabricația flexibilă, în abordare specifică Industriilor 4.0 și 5.0

- 1.1. Sisteme de producție pentru fabricația în flux
 - 1.1.1. Caracteristicile sistemelor pentru fabricația în flux
 - 1.1.2. Fabricația în flux și structura hardware a
 - 1.1.3. Modelarea cu RPS a fabricației în flux
 - 1.1.4. Simulări ale modelului RPS pentru determinarea parametrilor specifici fabricației în flux
 - 1.2. Tehnici de adaptare a sistemului pentru fabricația în flux, la fabricația flexibilă, cu aplicarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0
 - 1.2.1. Proiectarea hardware a sistemului pentru fabricația flexibilă în flux
 - 1.2.2. Fabricația în celula
 - 1.3. Structura hardware a sistemului integrat pentru fabricația flexibilă cu două fluxuri paralele. Aplicarea unor concepte specifice Industriilor 4.0 și 5.0
 - 1.4. Rezultate și contribuții științifice
-

În cadrul celei de-a doua revoluții industriale, apariția liniilor de asamblare a facilitat dezvoltarea fabricației în masă, pentru produse standardizate. Cu toate acestea, solicitările clienților pentru personalizarea produselor și serviciilor, au condus la îmbunătățirii și dezvoltării de noi tehnologii. Din această perspectivă, s-au căutat soluții pentru diversificarea, cu costuri minime, a fabricației pe liniile convenționale, sau transformarea sistemelor convenționale, în sisteme pentru fabricația flexibilă. În acest sens, reconfigurarea sistemelor de fabricație este o soluție pentru diversificarea producției, însă cu limitări majore relativ la gradul de diversificare.

În procesul de dezvoltare a sistemelor de fabricație, proiectarea configurației sistemului implică consolidarea unei structuri de lucru hardware, adecvată tehnologiei de execuție a produselor, precum și identificarea sarcinilor în utilizarea echipamentelor, ca module subordonate. Aceasta se corelează cu caracteristicile procesului de fabricație, timpul de ciclu, numărul de stații și echipamentele utilizate, precum și alocarea sarcinilor de lucru pe operații și secvențe de execuție [48].

1.1. Sisteme de producție pentru fabricația în flux

Sistemele de fabricație dedicate desfășurării succesive a operațiilor, numite și sisteme pentru fabricația în flux, sunt sisteme de producție care lucrează după o anumită tehnologie, pentru asamblarea unui tip de produs. Operațiile se desfășoară în stații între-conectate succesiv, configurate pentru a fi utilizate în procese repetitive, astfel încât să maximizeze eficiența și productivitatea. O caracteristică a acestor sisteme este specializarea stațiilor pe operații unice, fiecare stație de lucru, din linia de producție, fiind dedicată realizării unei operații specifice. Produsul finit rezultă prin parcurgerea succesivă a fluxului de fabricație, cu staționare în stații unde suportă/nu suportă o anumită operație. Astfel, produsul este supus la o succesiune de operații, conform tehnologiei de execuție specifice regimului de fabricație în

flux. Aceste sisteme sunt utilizate pentru a produce o gamă largă de produse – game de fabricație. În raport cu fabricația unui produs, sunt impuse restricții tehnice, tehnologice și de calitate a produsului finit. Mai mult, aceste sisteme de fabricație au capacitate de adaptare la sarcini de producție similare, cum ar fi produsele electronice sau componente auto, dar necesită modificări substanțiale pentru a se adapta la schimbări ale cerințelor de producție sau de produse.

1.1.1. Caracteristicile sistemelor pentru fabricația în flux

Pentru sistemele de fabricație, numărul și diversitatea produselor finite reprezintă o caracteristică esențială. În cazul în care se produce un singur tip de produs sau produse derivate din acesta, cu structura similară a componentelor, sistemul este asimilat cu o linie de producție adaptată fabricației produselor cu tipologie unică [49]. Cu toate acestea, sistemele moderne de fabricație pot produce mai multe tipologii de produse, precum și tipologii derivate din produsul de bază [50, 51].

În astfel de situații, se poate implementa o linie de producție mixtă, pe care se pot fabrica produse aparținând unei familii de produse ca tipologie. Fabricația acestor produse, respectă secvențe de operații determinate arbitrar, sau pe baza unui algoritm [52]. Eficiența sistemului este strâns legată de planificarea secvențelor de producție, care trebuie să ia în considerare uzura echipamentelor și reparațiile planificate sau neplanificate ale sistemului de producție [53].

În cazul în care este necesară reconfigurarea sistemului, pentru a putea produce mai multe tipologii, secvențele de producție sunt aplicate pe loturi, pentru fiecare tipologie de produs [52]. Între etapele de fabricare a loturilor, are loc reconfigurarea sistemului, în acord cu o nouă tipologie de produs. Astfel, problema optimizării sistemului nu este determinată doar de secvențierea loturilor, ci și de dimensiunile acestora [54]. Această abordare are ca scop maximizarea eficienței sistemului de producție, prin reducerea timpului de configurare și creșterea ratei de utilizare a echipamentelor, ceea ce conduce la o creștere a productivității și a profitului [53].

Sistemele de asamblare pot fi clasificate în funcție de modul de execuție a sarcinilor de lucru și sincronizarea acestora. Din acest punct de vedere, ele se pot clasifica în sisteme de asamblare cu cadență și fără cadență. În cazul sistemelor cu cadență, fiecare stație de lucru trebuie să îndeplinească o sarcină, într-un timp prestabilit [55]. Ritmul de avansare a produselor între stații, sau cadența liniei, este impus de operația cu durata cea mai mare, pe o anumită stație. Astfel, transferul pieselor între stații se face simultan, iar duratele de producție, așteptare și transport sunt uniforme la nivelul tuturor stațiilor. Astfel, intervalele de producție devin fixe și determinate de timpul de ciclu [56].

În cadrul sistemelor de fabricație fără cadență, piesele nu așteaptă un timp prestabilit pentru a fi transferate, ci sunt procesate și transferate la terminarea unui set de operații. Această metodă de conducere este preferată, atunci când există variații ale timpilor de asamblare, în stații [57]. Există două tipuri de sisteme de fabricație fără cadență: cele sincrone și cele asincrone. În cazul sistemelor sincrone, transferul pieselor se face după ce toate stațiile și-au terminat sarcinile, cu inducerea unor timpi de așteptare [58]. În cazul sistemelor asincrone, piesele sunt transferate imediat ce sunt procesate, cu condiția ca stația succesoare să nu fie blocată de o altă piesă [59].

Sistemele de producție sunt caracterizate de variații ale timpilor de execuție, care pot fi determinați sau aleatorii. Dacă variația timpilor de execuție este suficient de mică, timpul

determinist poate fi considerat o aproximație fidelă a timpului real de execuție [60]. În astfel de cazuri, planificarea deterministă este justificată, cum se întâmplă la stațiile automate sau la operațiunile repetitive, realizate cu roboții industriali [61]. Cu toate acestea, în majoritatea cazurilor, timpul real de execuție este aleator și condiționat de factori care nu pot fi prevăzuți sau controlați, în mod direct. Acești factori includ defectarea utilajelor, parametrii incorecți, alte evenimente imprevizibile [62].

Timpii aleatorii de execuție pot influența semnificativ execuția optimă a producției. Acești timpi pot fi cauza problemelor de încetinire a procesului, și scădere a eficienței [63]. Deși majoritatea timpilor aleatorii sunt determinați de factori care nu pot fi influențați direct, se poate interveni prin utilizarea de echipamente performante sau prin adoptarea unor proceduri de mentenanță eficiente [64].

În anumite cazuri, timpii de execuție devin variabile dinamice, fiind influențate de variații ale duratelor de procesare [65]. O cauză poate fi reducerea sistematică a duratelor de procesare, datorită efectelor de învățare sau îmbunătățire a proceselor de producție [66]. O altă cauză o reprezintă timpii de execuție determinați în condiții standardizate de operare, abaterea de la aceste condiții putând duce la creșterea timpilor de operare [67]. Prin urmare, este important ca factorii care influențează timpii de execuție să fie monitorizați permanent, pentru a asigura eficiența și productivitatea optimă a producției [68].

În cadrul proiectării unui sistem de fabricație, există o varietate de configurații posibile care pot fi luate în considerare [69]. Decizia privind configurația sistemului este influențată de analiza configurației produsului și locația în care va fi amplasat sistemul de fabricație [70]. Configurația cea mai frecvent utilizată este cea a fabricației seriale, în care mai multe stații, conectate succesiv, realizează sarcini unice, prin transfer/staționare în lungul unui conveior [71].

O altă configurație este plasarea în formă de U a stațiilor de lucru, bazată pe principiul de producție *just-in-time*. Configurația este justificată de plasarea roboților industriali în centrul formei U, astfel încât să poată deservi mai multe stații [72]. În acest caz, sarcinile pot fi grupate și realizate secvențial. Cu toate acestea, există cazuri în care o stație poate recepționa sarcini multiple, alocate în paralel. Aceste stații, denumite *crossover* [73], includ sarcini localizate în diferite zone ale liniei de producție, unde este necesară deplasarea sistemelor robotice. Sistemele de fabricație în formă de U prezintă avantaje care constau în reducerea costurilor prin utilizarea sistemelor robotice la sarcini multiple, creșterea flexibilității producției și reducerea numărului de stații necesare, prin gruparea mai multor sarcini, într-o sarcină unică alocată aceleiași stații [74].

Pornind de la liniile de fabricație în formă de U, s-au dezvoltat sisteme de producție *multi-U*, care sunt compuse din n-U linii de fabricație, în care liniile U adiacente sunt deservite de un număr de stații comune [75]. Dacă timpii pentru realizarea unei sarcini, într-o anumită stație, sunt mari, se pot introduce stații de lucru paralele care realizează concomitent aceeași sarcină, pe un număr mai mare de produse [76]. Acesta conduce la o reducere proporțională a mediei timpului de prelucrare, pentru sarcina respectivă, în funcție de numărul de stații paralele. Atunci când există o cerere mare de produse, se recurge la paralelizarea producției [77]. În acest caz se implementează sisteme de producție cu linii de fabricație multiple și duplicate [78].

1.1.2. Fabricația în flux și structura hardware a sistemului de laborator

Sistemele de laborator pentru fabricația în flux sunt sisteme didactice sau destinate cercetărilor, cu structură similară sistemelor reale, dar cu dimensiuni reduse ale capacităților de lucru sau ale sistemelor de deservire [79]. Aceste sisteme includ linii de asamblare automate, aparate de testare și sisteme de monitorizare. Conducerea acestor sisteme de fabricație este realizată cu echipamente industriale, care asigură un transfer tehnologic rapid [80]. Caracteristica principală a acestor sisteme este modularitatea, prin care se realizează o adaptare rapidă la noile cerințe de producție sau la modificările procesului [81]. Sistemele de fabricație de laborator sunt utilizate în cercetarea și în dezvoltarea de produse și tehnologii noi, precum și în instruire.

Produsul realizat pe linia de fabricație de laborator (Figura 1) are o structură de componente dispuse pe trei straturi, plasate în formă asamblată pe *pallet*. Fiecare strat este asamblat în stații specializate, care poziționează componentele într-un mod precis, în funcție de configurația produsului. Primul strat este reprezentat de baza produsului (*base*), care oferă structura și stabilitatea necesară. Al doilea strat este format dintr-un set de piese intermediare (*big parts*), care poate fi personalizat în funcție de cerințele clientului și/sau de restricțiile specifice producției. Al treilea strat este reprezentat de capacul produsului (*top*), care se plasează la sfârșitul asamblării și rigidizează produsul final.

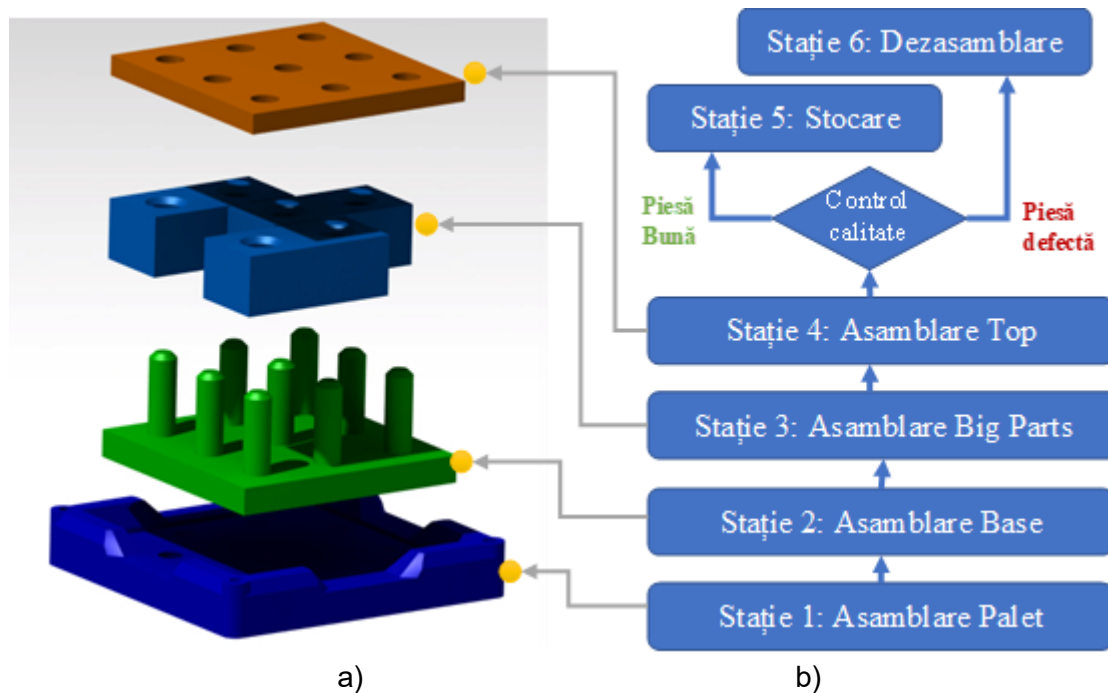


Figura 1. a) Elemente componente ale produsului asamblat pe linia de fabricație de laborator; b) Schema bloc aferentă succesiunii operațiilor de fabricație în flux.

Datele referitoare la operațiile necesare pentru fabricația produsului sunt stocate pe un tag RFID încorporat în *pallet*. Aceste date sunt utilizate în cursul execuției operațiilor de asamblare, testarea calității, depozitare. Configurația stratului intermediar al produsului este stabilă în funcție de cerințele clientului. Ea poate fi preluată și transmisă prin intermediul unei interfețe om-mașină (HMI), și integrată în sistemul de fabricație. Această interfață permite introducerea caracteristicilor producției, relativ la numărul de produse din lot, date și restricții impuse fabricației. Prin urmare, sistemul de fabricație oferă o interfață adaptată la cerințele specifice ale clientului, care permite preluarea unei comenzi personalizate.

Considerând structura produsului, configurația minimală a sistemului de fabricație constă din șase stații de lucru, interconectate în flux: patru stații de asamblare, o stație de control al calității, o stație de stocare a produselor conforme și o stație de dezasamblare a produselor care nu au trecut testul de calitate. Fiecare stație, responsabilă cu asamblare, are rolul de a asambla un strat de componente, prin operații distincte..

Conducerea fabricației se realizează prin intermediul PLC-urilor integrate în fiecare stație de lucru (Figura 2). Astfel, fiecare stație funcționează independent, comunicând informațiile necesare celorlalte stații. Comunicarea între PLC-uri se face prin protocolul ProfiNet, iar conexiunea cu componentele fizice de execuție ale stațiilor se realizează prin porturile de intrare/ieșire. Sensorii de monitorizare a proceselor sunt conectați la intrările digitale ale PLC-urilor, în timp ce componentele de tip electrovalve și elemente de acționare sunt conectate la ieșirile digitale. Componentele cu sarcini de execuție complexe, driverele pentru motoare, sunt comandate tot cu PLC-uri, prin intermediul protocolului ProfiNet.

O interfață om-mașină (HMI), conectată la rețeaua ProfiNet a sistemului, facilitează interconectarea sistemului de fabricație, cu mediul decizional extern. Acest lucru permite operatorului să introducă datele specifice fabricației curente, numărul de produse și configurația stratului intermediar de piese pentru fiecare produs. Prin intermediul interfeței HMI operatorul monitorizează și comandă procesul de producție, având acces la informații despre starea stațiilor de lucru și stadiul producției. În plus, interfeța HMI, conectat la rețeaua ProfiNet a sistemului, realizează o comunicație rapidă cu celelalte stații, dar și o sincronizare bună cu acestea, ceea ce conduce la evitarea posibilelor probleme și erori care pot apărea în timpul producției.

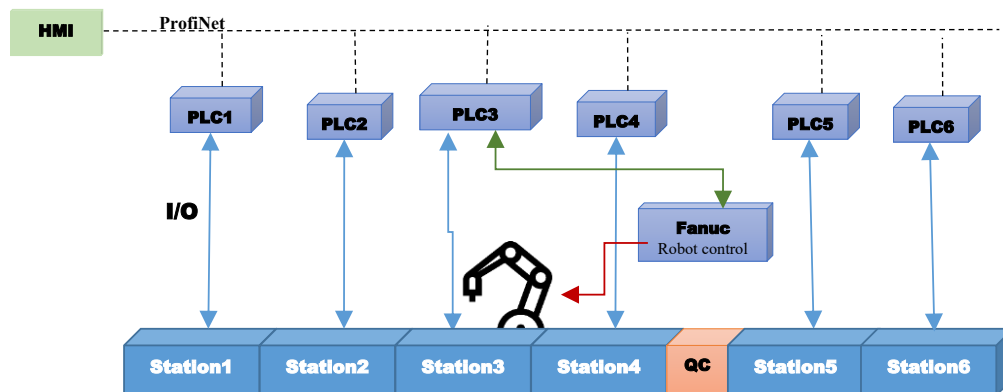


Figura 2. Arhitectura sistemului de conducere a liniei de fabricație

Produsul livrat la finalul procesului de asamblare este obținut prin operații succesive, fiecare strat de componente fiind asamblat într-una dintre cele patru stații de lucru ale sistemului. Fiecare stație execută secvențe unice de *operații* de asamblare a unui strat de componente.

În Stația 1, este plasată componenta *pallet* care transportă produsul pe întregul traseu al fabricației, până când ajunge în stare de produs finit. Acest *pallet* este dotat cu un tag RFID pe care se stochează informațiile aferente secvențelor de fabricație. În fiecare stație, informațiile legate de asamblarea produsului sunt citite. Este înregistrat de asemenea, fiecare moment al intrării în stație, a produsului parțial asamblat. Datele de fabricație ale produsului sunt scrise pe tag-ul RFID, înainte de ieșirea acestuia din Stația 1, și după plasarea componentei pe sistemul de transport.

realizează fixarea componentei. După finalizarea acestei operațiuni de asamblare, produsul este transportat spre Stația 5, în zona de control al calității (QC).

La intrarea în zona de control al calității din Stația 5, datele despre configurația produsului sunt citite de pe tag-ul RFID, iar produsul este supus unei inspecții vizuale automate pentru a se detecta eventualele defecte. Dacă produsul este conform cu specificațiile dorite, acesta este transportat și stocat în stiva din această stație. În caz contrar, produsul este direcționat spre Stația 6 pentru dezasamblare.

Stația 6, gândită ca extensie a liniei de laborator, a fost proiectată și implementată integral în *Laboratorul de cercetare - Linii de fabricație și procese industriale automatizate deservite de sisteme robotice*, de la Institutul de cercetare ICSTM_Valahia, în cadrul unui proiect de cercetare, coordonat de Universitatea „Dunărea de Jos” [82].

În Stația 6 a sistemului de fabricație, produsul defect este supus unui proces de dezasamblare strat cu strat. Inițial produsul intră în Stația 6, este transportat și poziționat într-o locație dedicată, prevăzută cu un sistem de fixare. Componentele obținute în urma dezasamblării sunt ulterior recuperate în magaziiile stațiilor de asamblare, prin manipulare și transport cu roboți mobili. Dezasamblarea este realizată cu un robot cartezian (Figura 3) configurat și dotat cu sistemul matriceal de vacuum, astfel încât toate componentele produsului să poată fi extrase cu precizie și transportate în zonele desemnate.

1.1.3. Modelarea cu RPS a fabricației în flux

Analiza dinamicii sistemului de fabricație în flux (IFS), deservit de manipulatorul robotic FANUC, se bazează pe modelul asociat procesului. Prin utilizarea instrumentului de modelare cu Rețele Petri sincronizate (RPS) s-a obținut (Figura 4):

$$RPS_{IFS} = \langle RPT_{IFS}, E_{IFS}, Sync_{IFS} \rangle, \quad (1.1)$$

în care modelul temporizat RPT este reprezentat de

$$RPT_{IFS} = \langle P_{IFS}, T_{IFS}, I_{IFS}, O_{IFS}, m_{0_IFS}, temp_{IFS} \rangle. \quad (1.2)$$

În cadrul modelului RPT mulțimea stărilor rețelei este reprezentată de $P_{IFS} = \{P_{asmb}, P_{robot}, P_{dep}, P_{ctrlIFS}\}$, cu:

$P_{asmb} = \{P_i\}_{i=1,13}$ - mulțimea stărilor produsului corespunzătoare stadiilor de asamblare, transport sau de așteptare ;

$P_{dep} = \{P_j\}_{j=14,18}$ - mulțimea stărilor asociate magaziiilor cu componente din stații, aflate în proces dinamic de deservire a fabricației, și a depozitului de produse care au trecut testul de calitate;

$P_{ctrlIFS} = \{P_k\}_{k=19,23}$ - mulțimea stărilor de validare a finalizării fabricației unui produs;

$P_{ctrlIFS} = \{P_{24}\}$ - starea manipulator robotic care deservește, în Stația 3, procesul de asamblare.

Mulțimea tranzițiilor în cadrul rețelei este reprezentată de $T_{IFS} = \{T_{asmb}, T_{transp}, T_{resup}, T_{start}\}$ unde:

$T_{asmb} = \{T_i\}_{i=9,12}$ - mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor de asamblare în stații;

$T_{transp} = \{T_j\}_{j=2,8}$ - mulțimea tranzițiilor asociate operațiilor de transport, din zona de așteptare a stației, în zona de asamblare a stației următoare;

$T_{resup} = \{T_k\}_{k=13,17}$ - mulțimea tranzițiilor asociate operațiilor de realimentare cu componente a magaziiilor din stații, precum și operația de stocare a produselor finite în depozitul Stației 5.;

$T_{start} = \{T_1\}$ - tranziția asociată operației de inițializare a fabricației. Această tranziție este validată de starea asociată informațiilor despre producție, și de starea asociată disponibilității Stației 1.

Funcția de ponderare a arcelor de ieșire reprezintă ponderile arcelor care conectează diferite poziții la anumite tranziții, fiind reprezentată de

$$I_{IFS} : (P_{IFS} \times T_{IFS}) \rightarrow Q_+. \quad (1.3)$$

Funcția de ponderarea a arcelor de ieșire reprezintă ponderile arcelor care conectează anumite tranziții cu anumite poziții, fiind reprezentată de

$$O_{IFS} : (T_{IFS} \times P_{IFS}) \rightarrow Q_+. \quad (1.4)$$

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje asociat stărilor inițiale, este reprezentat de

$$m_{0_IFS} : P_{IFS} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (1.5)$$

Marcajul temporizat al tranzițiilor în cadrul rețelei Petri, asociază tranzițiilor duratele operațiilor

$$temp_{IFS} : T_{IFS} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (1.6)$$

Evenimentele externe reprezentate de semnalele care transmit informații necesare procesului, sunt definite prin

$$E_{IFS} = \{E_{IFS}^1\} \cup \{e_{IFS}\}. \quad (1.7)$$

Funcția $Sync_{IFS}$ condiționează execuția unor tranziții de recepția evenimentelor externe:

$$Sync_{IFS} : \{T_1\} \rightarrow \{E_{IFS}^1\} \cup \{e_{IFS}\}, \quad (1.8)$$

cu e_{IFS} evenimentul neutru încorporat în monoidul E_{IFS}^* . Astfel se poate defini

$$Sync1_{IFS} : T_1 \rightarrow \{E_{IFS}^1\}, \quad (1.9)$$

unde $E_{IFS}^1 = Sync1_{IFS}$ reprezintă semnalul de sincronizare dintre momentul de început al procesului de fabricație și cel de sfârșit al procesului de achiziție a datelor.

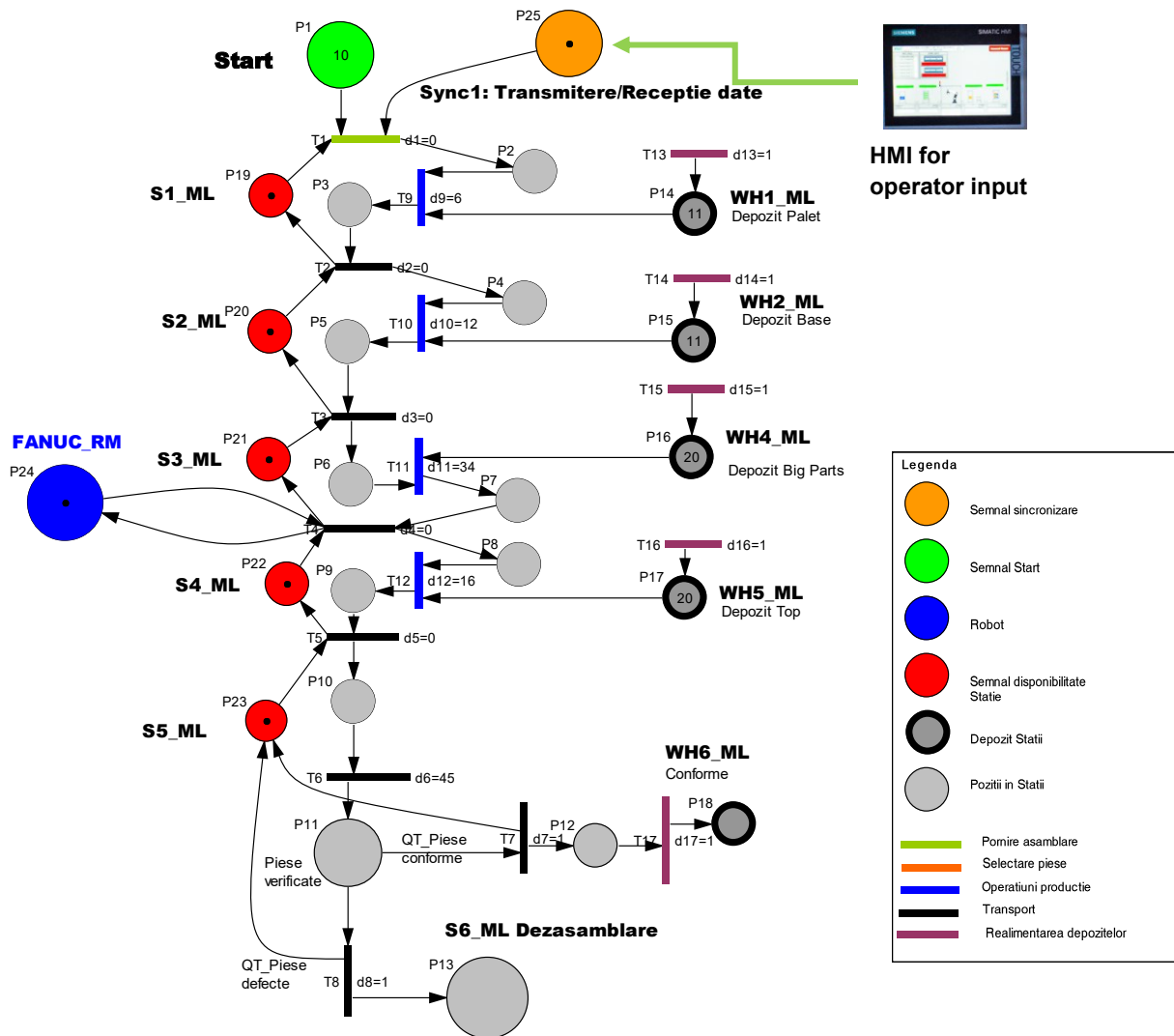


Figura 4. Modelul RPS al sistemului de laborator pentru fabricația în flux

1.1.4. Simulări ale modelului RPS pentru determinarea parametrilor specifici fabricației în flux

În urma simulării modelului RPS, se obțin informații care descriu succesiunea operațiilor și duratele de așteptare pentru produsele asamblate. Rezultatele simulării sunt prezentate în Figura 5, fiind reprezentate duratele în care produsul este implicat într-o operație activă, sau de așteptare.

În urma simulării procesului se observă că duratele de așteptare, în perioada de inițializare, ale fiecărei piese sunt zero până la momentul în care se ajunge la stația cu cel mai lung timp de operare. Timpii mari de execuție din Stația 3, generează un efect de *bottleneck* care se propagă în stațiile anterioare. Implicit se generează timpuri de inactivitate în stațiile conectate în poziții care succed Stația 3.

Figura 5 ilustrează și perioada de stabilizare a procesului, cu o creștere a timpilor de așteptare influențată de Stația 3. După stabilizarea timpilor de așteptare, se pot explora diverse opțiuni pentru utilizarea optimă a încărcării stațiilor și creșterea productivității. O planificare îmbunătățită a fabricației ar trebui să conducă la mărirea capacităților de lucru ale procesului, implicit la creșterea capacității de producție.

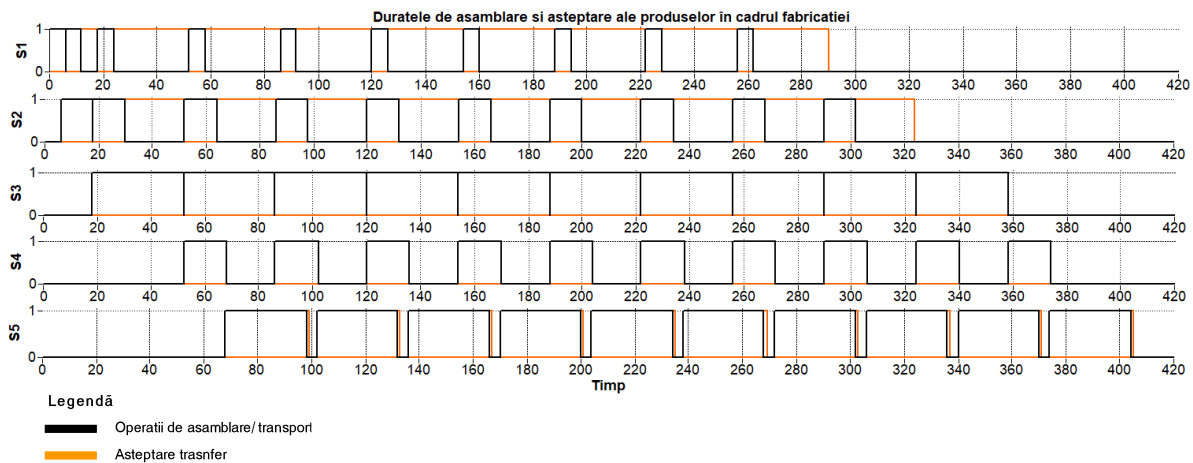


Figura 5. Duratele operațiilor pentru asamblarea unui produs, din stațiile S1-S5

1.2. Tehnici de adaptare a sistemului pentru fabricația în flux, la fabricația flexibilă, cu aplicarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0

Sistemele pentru fabricația flexibilă pot produce o gamă variată de produse, derivate din tipologii specifice unor game de fabricație. Fabricația este flexibilă în sensul în care, pe același sistem de producție, se pot realiza produse cu tipologii diferite. Un sistem este dedicat constructiv și tehnologic fabricației flexibile sau poate ajunge să aibă această capacitate dacă se identifică tehnici sau tehnologii de adaptare. Acestea pot transforma un sistem pentru fabricația în flux, în sistem pentru fabricația flexibilă, folosind principii și tehnici diferite de cele convenționale ale sistemului inițial. Există diferite abordări în acest sens:

- o soluție o reprezintă reconfigurarea sistemului în flux și reconectarea stațiilor de lucru în acord cu noua configurație a produsului dorit, respectiv cu tehnologia de execuție a acestuia;
- un sistem pentru fabricația în flux se poate transforma în sistem pentru fabricația flexibilă, dacă se menține configurația hardware a acestuia și se oferă accesul produsului în curs de asamblare, la stațiile în care el trebuie să suporte o nouă operație de asamblare [83]. Astfel, procesul de fabricație flexibilă va rezulta din implementarea unui sistem suplimentar de transport, care va efectua secvențe de manipulare și transport al produsului între stații. Produsul nu mai urmează fluxul serial ci este transportat în alte stații, în ordinea dictată de operațiile rezultate din tehnologia de execuție a acestuia.

Astfel, conducerea procesului de fabricație dobândește atributul de *reziliență*, în sensul integrării funcției de compensare a perturbațiilor care pot apărea în cursul fabricației, cu asigurarea fabricației continue. Aceste perturbații pot include întârzieri în transportul componentelor și perturbații generate de defectele ale echipamentelor. În cazul apariției unor defecte la nivelul echipamentelor, trebuie luate în considerare modalități de continuare a procesului de producție până la remediarea problemelor. Un proces conceput să funcționeze pe fluxuri paralele, are capacitate de fabricație continuă, care oferă soluția comutării fabricației pe un flux alternativ, dacă fluxul curent intră în avarie.

Prin urmare, se poate lua în considerare extinderea gamei inițiale de produse prezentate în Figura 1 prin introducerea componentei suplimentare *small part*, astfel încât să fie posibilă fabricația a încă patru tipuri de produse, pentru un total de cinci tipologii (Figura 6). Această

abordare conduce la o îmbunătățire a utilizării echipamentelor existente și la reducerea costurilor asociate cu achiziționarea și întreținerea unor noi echipamente.

În cadrul acestei lucrări de cercetare au fost analizate două tipologii de produse dintr-o gamă potențială de cinci, respectiv piesa inițială Tip 2 (Figura 6.b.), și o piesă nouă cu structură multistrat, Tip 1 (Figura 6.c.). Procesul de fabricație pentru aceste două tipuri de produse a fost proiectat pe baza procesului de fabricație în flux inițial, fiind reutilizate echipamentele inițiale, și a manipuloarelor robotice ABB (MR1) și FANUC (MR2).

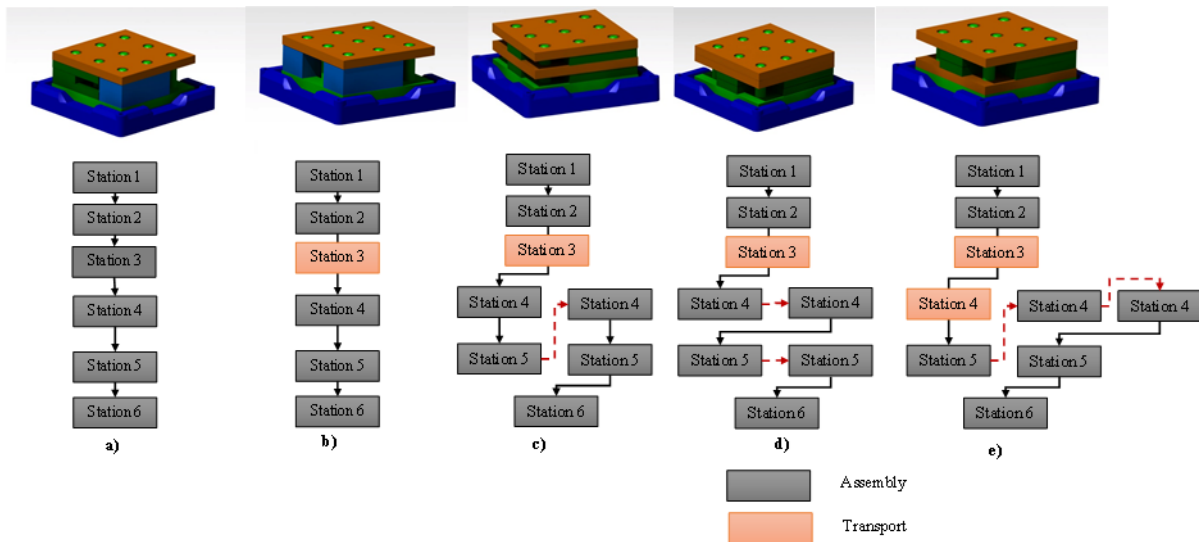


Figura 6. Succesiunea operațiilor din stații pentru fabricația în flux și flexibilă. a) Fabricația în flux deservită de MR1, MR2, a unui produs Tip 2; b) Fabricația în flux deservită de un MR2, a unui produs Tip 2; c), d) e) Fabricația flexibilă deservită de MR2, pentru produse Tip 1, cu repetarea operațiilor din Stațiile 4, 5, în diferite combinații

1.2.1. Proiectarea hardware a sistemului pentru fabricația flexibilă în flux

Realizarea unor tehnici de adaptare a procesului de fabricație în flux, la unul pentru fabricația flexibilă în flux (FFM) a pornit de la ipoteza că pe același sistem de producție se vor fabrica două tipuri de produse, Tip 1 și Tip 2, cu solicitarea echilibrată a resurselor de producție. Proiectarea procesului, a presupus dezvoltarea celor două sisteme pentru fabricația flexibilă, destinate fabricației paralele:

- etapa 1: s-a analizat introducerea unui sistem de transport suplimentar, pe direcție paralelă cu direcția fluxului de interconectare a stațiilor, care să realizeze operațiile de transport și poziționare a produsului în stații, conform tehnologiei de execuție a produsului;
- etapa 2: s-a considerat introducerea unui proces paralel de producție prin implementarea unei celule flexibile de fabricație (FMC) ca „stație integrată” în sistemul de fabricație în flux. Se menține deci structura de conectare succesivă a stațiilor, cu una din stații având potențial maxim de adaptare la fabricația flexibilă.

Considerând ipoteza și propunerile anterioare, a fost realizată o comparație între procesul de asamblare a unui produs de Tip 2 (Figura 1) și un produs de Tip 1 (Figura 7). Se observă că diferența de componente dintre cele două produse, este dată de stratul de piese interne. Straturile intermediare rezultă din asamblarea a două tipuri de componente, corelată cu tipologia produsului. Aceste componente sunt asamblate în aceeași stație, deservită de un

braț robotic. În plus, diferența dintre cele două tipuri de produse constă în repetarea ultimelor două straturi, ceea ce presupune repetarea unui set de operații de asamblare.

Pentru a transporta produsul în stații, sau pentru repetarea unor operații de asamblare, conform secvențelor de execuție ale produsului, a fost implementat un sistem de transport dotat cu un robot SCARA (Figura 8). Robotul SCARA realizat este prevăzut cu două grade de libertate de rotație și un grad de translație pe direcție verticală, pentru operațiile de manipulare și re poziționare. Robotul SCARA este componentă a unui sistem liniar de transport, cu ghidaje de deplasare pe orizontală, paralele cu direcția de transport a conveioarelor. Acest sistem de transport, care împreună cu robotul SCARA utilizează patru grade de libertate, permite preluarea produsului asamblat parțial, din locația dedicată, și plasarea sa într-o altă stație, pentru repetarea unei operații de asamblare. Deoarece operațiile de asamblare se execută în stații învecinate, produsul necesită secvențe de transport, pe direcție paralelă cu fluxul de producție. După execuția operațiilor recurente, produsul va urma fluxul de fabricație. Transportul produsului este realizat între punctul de ieșire al Stației 4 și intrarea Stației 3.

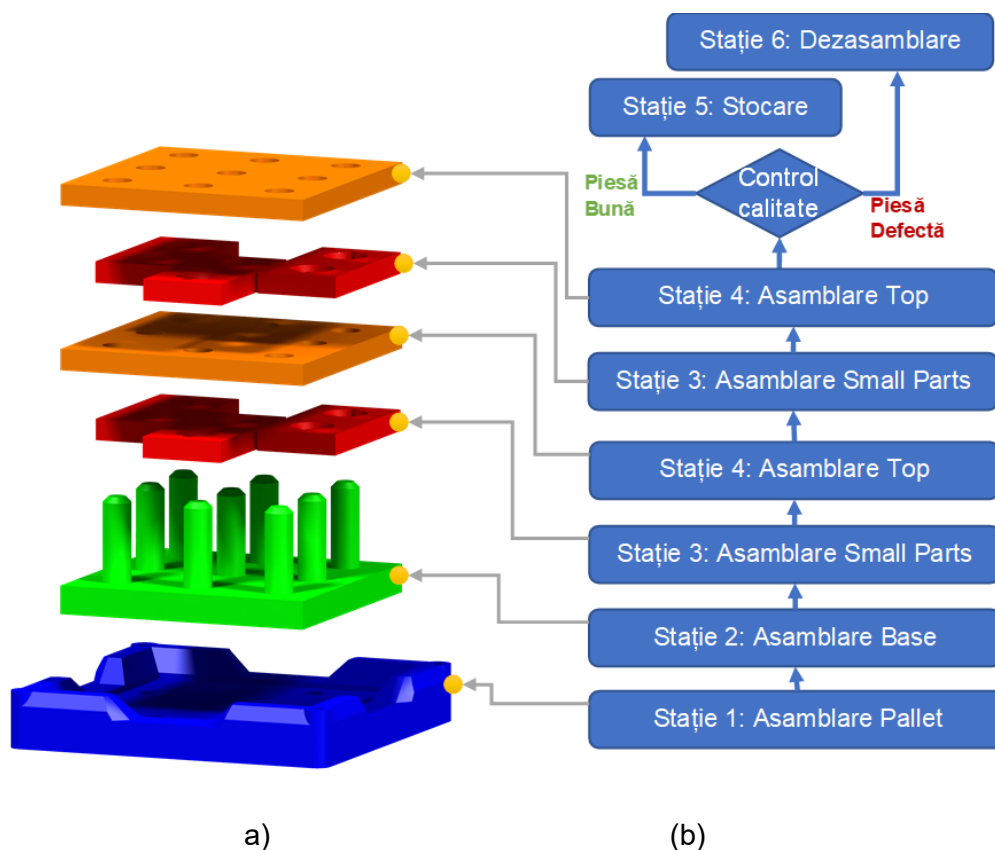


Figura 7. a) Componentele produsului Tip 1 asamblat pe IFMS; b) Schema bloc a planificării operațiilor de asamblare a produsului multistrat, pe IFMS

În această etapă s-a realizat un sistem flexibil care realizează conectarea succesivă a stațiilor de lucru. Funcția de fabricație flexibilă este asigurată de sistemul robotic SCARA care execută transportul produsului între stații, pentru repetarea unor operații, dacă acestea rezultă din configurația și tehnologia lui de execuție. Echiparea liniei cu sistemul de transport SCARA, suplimentează sistemul de transport al pieselor, astfel încât produsul poate fi transportat și de sistemul robotic cu deplasări în ambele sensuri în lungul ghidajului longitudinal, paralel cu linia de conveioare. Există însă un dezavantaj al utilizării acestei tehnologii: fabricația flexibilă pe linie are o capacitate de producție limitată, datorită duratelor relativ mari care se consumă pentru operațiile cumulate de manipulare și transport.

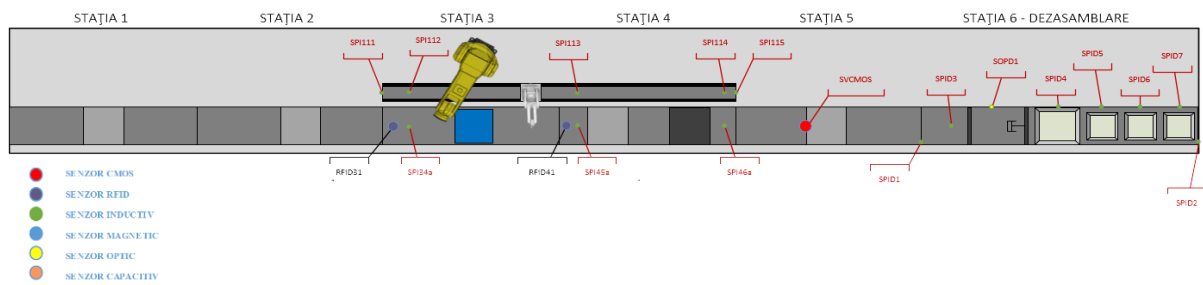


Figura 8. Sistem integrat pentru fabricația flexibilă echipat cu sisteme robotice, pentru operațiile de manipulare, asamblare, transport

În cazul unei cereri de producție mari, în sensul volumului, se completează sistemul și cu o celulă dedicată fabricației flexibile. Linia de fabricație devine astfel un sistem cu două fluxuri paralele pentru fabricația flexibilă.

Astfel, în cea de-a doua iterație a dezvoltării tehnicilor de adaptare a fabricației în flux la o fabricație flexibilă, sistemul de producție va utiliza structura hardware compusă din șapte stații de lucru (Figura 9) și un sistem de transport, paralel cu transportul din stații. Raportat la sistemul anterior, Stația 3 a fost translatată în poziția 4, poziția 3 fiind atribuită unei celule pentru fabricația flexibilă echipată cu un braț robotic. Odată cu introducerea celulei flexibile, operația de asamblare a componentelor din stratul intermediar va fi efectuată în Stația 4, în timp ce operația de asamblare a componentei *top* va fi realizată în Stația 5.

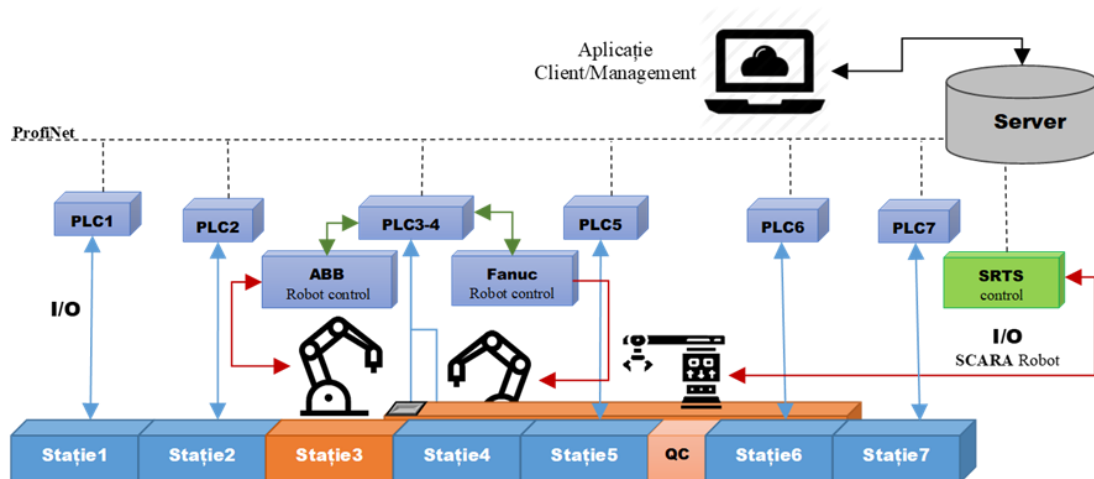


Figura 9. Sistemul integrat pentru fabricația flexibilă în flux (FFM) și fabricația în Celula flexibilă (FMC)

În procesul de asamblare flexibilă în flux, se execută produse Tip 1 și Tip 2. Stația 3 nu este implicată în fabricația în flux, deoarece în Celula flexibilă se execută un proces paralel de asamblare, independent de cel de pe linie. Produsele tranzitează Stația 3, ajung în Stația 4 unde se realizează asamblarea componentelor din stratul intermediar. După realizarea acestei operații, produsele sunt transportate pe conveyer către Stația 5, unde are loc asamblarea și fixarea componentei *top*, intermediară sau finală a produsului.

În cazul asamblării produselor de Tip 1, în postul 5 se va plasa primul *top* intermediar, produsul parțial asamblat este transportat înapoi, prin intermediul sistemului robotic de transport SCARA (SRTS), la Stația 4, unde se inițiază un nou set de operații de asamblare a componentelor *small parts* (Figura 10). În urma asamblării în Stația 5 a componentei *top* – ultima componentă, produsul este transportat către Stația 6, pentru controlul de calitate. Dacă produsul este conform, acesta este stocat în magazia aferentă Stației 6. În caz contrar,

produsul defect este transportat pentru dezasamblare. Procesul din cadrul Stației 6 este asemănător pentru produsele Tip 1 și Tip 2.

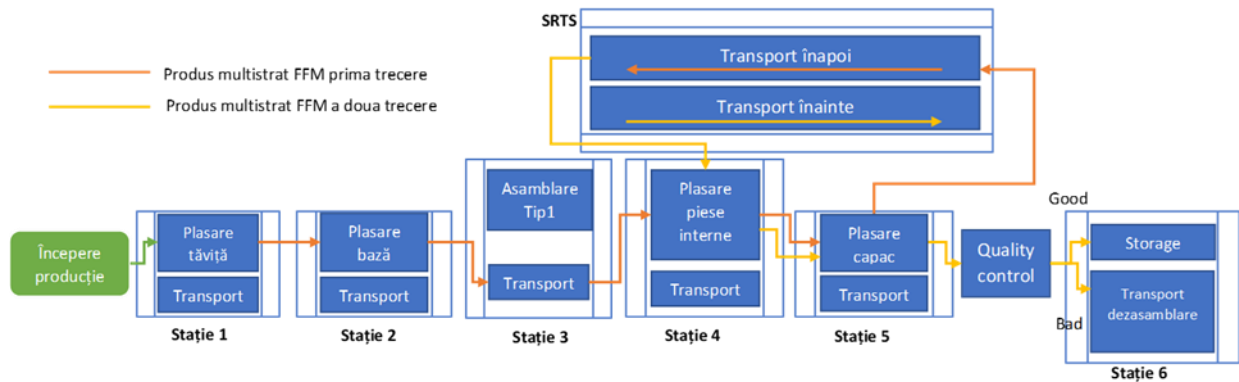


Figura 10. Succesiunea operațiilor de asamblare și transport pentru fabricația unui produs Tip 1 pe FFM

1.2.2. Fabricația în celula flexibilă, ca subproces al fabricației pe IFMS

Pentru fabricația flexibilă în celulă (FMC) a fost proiectat un sistem care permite asamblarea și dezasamblarea completă a produselor (Figura 11), prin intermediul brațului robotic specializat ABB. În celula flexibilă se assemblează doar produse Tip 1. Depozitele cu componente sunt poziționate în interiorul celulei, în proximitatea brațului robotic.

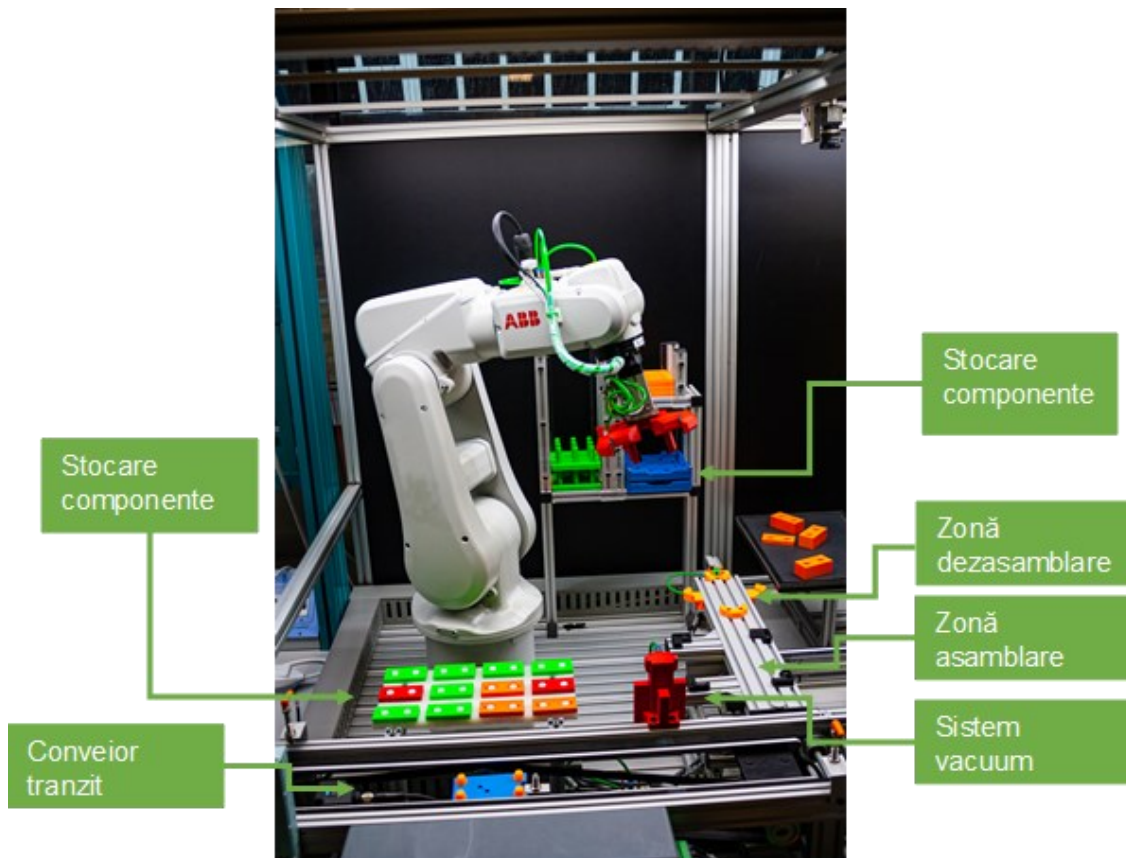


Figura 11. Stația 3 – Celula flexibilă echipată cu manipulator ABB

Manipulatorul ABB preia componentele necesare și efectuează succesiv operațiile de asamblare. În plus, pentru asamblarea componentelor *small parts*, se utilizează un sistem de prindere cu vacuum, pentru efectuarea cu ușurință a operațiilor de manipulare (preluare,

transport și eliberare). Sistemul de *pick-up* cu vacuum a fost soluția optimă pentru prinderea componentelor, deoarece acestea sunt așezate în poziții aleatoare, pe o magazie orizontală. Dacă procesul de asamblare este realizat prin operații repetitive de manipulare, transport și asamblare a componentelor, dezasamblarea în FMC se realizează prin apucarea cu gripper sau cu sistemul de vacuum, a fiecărei componente, și plasarea acesteia în depozitele corespunzătoare.

După finalizarea procesului de asamblare, produsul este preluat de SRTS, din zona de asamblare a celulei flexibile, și transportat la controlul de calitate. Dacă produsul prezintă defecte, el va fi transportat înapoi în FMC, pentru dezasamblare și recuperare de componente.

În proiectarea tehnologiei de asamblare/dezasamblare pe sistemul integrat pentru fabricația flexibilă, se consideră ipotezele: dacă un produs defect a fost asamblat pe FFM, el va fi dezasamblat în Stația 7; dacă un produs defect a fost asamblat în FMC, va fi transportat înapoi în celulă (cu SRTS), și dezasamblat complet în FMC.

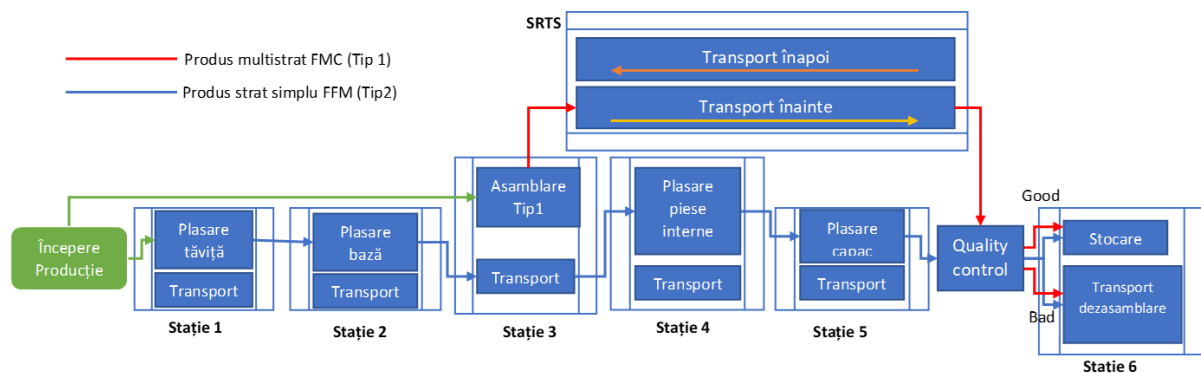
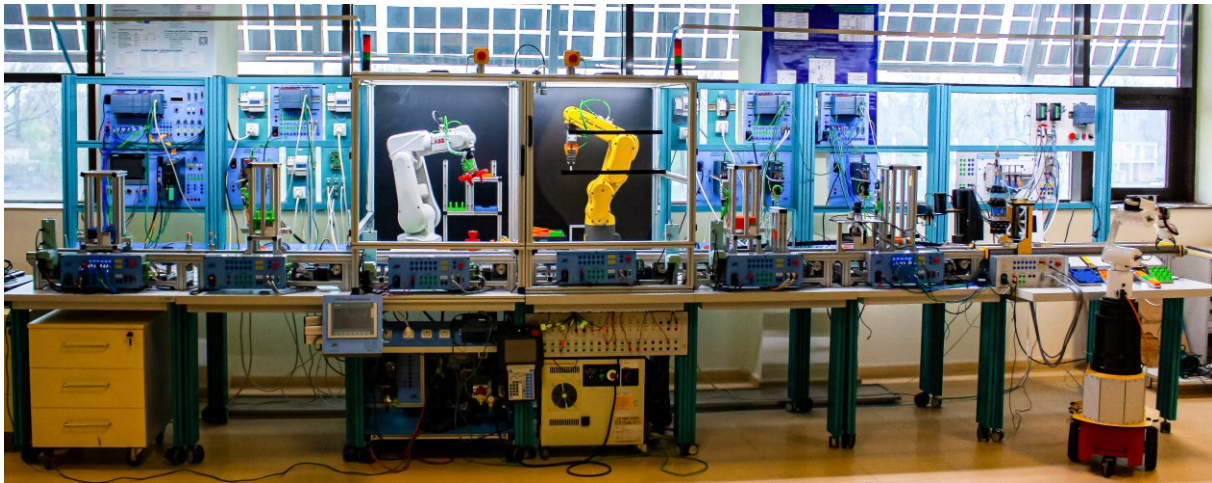


Figura 12. Succesiunea operațiilor pentru fabricația flexibilă în FMC

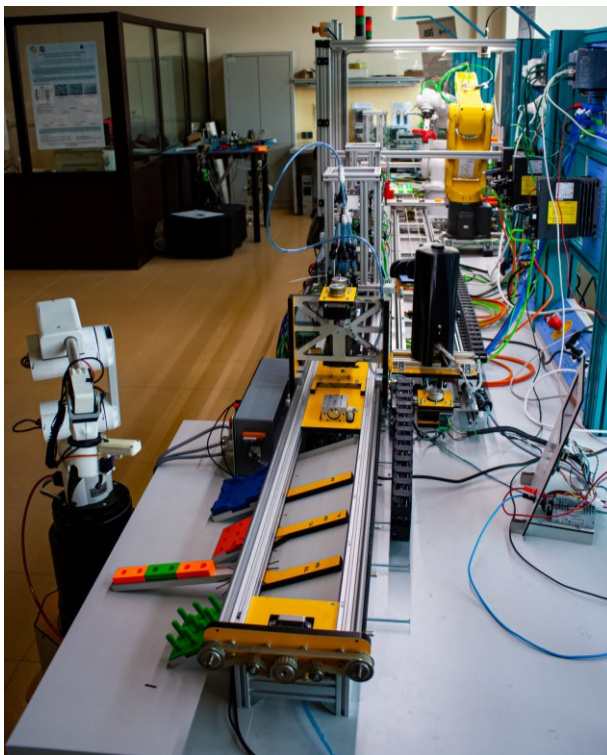
1.3. Structura hardware a sistemului integrat pentru fabricația flexibilă cu două fluxuri paralele. Aplicarea unor concepte specifice Industriilor 4.0 și 5.0

În baza proiectării proceselor pentru fabricația flexibilă în flux și în celulă, a fost dezvoltat un sistem integrat de fabricație, IFMS_4.0_5.0, subordonat conceptelor de Industriile 4.0 și 5.0, (Figura 13). Deoarece IFMS_4.0_5.0 a fost proiectat pentru fabricația totală, având capacitate de efectuare a unui ciclu complet operațional de asamblare, dezasamblare, recuperare și reutilizare de componente. Astfel IFMS_4.0_5.0 are în structura hardware o configurație de șapte stații conectate succesiv, deservite de patru sisteme robotice: două brațe robotice care echipează Stațiile 3 și 4, un sistem robotic de transport SCARA (SRTS), pentru operații de manipulare și transport bidirecțional între stații, și un robot autonom Pioneer, care deservește operațiile de manipulare și transport a componentelor reutilizabile.

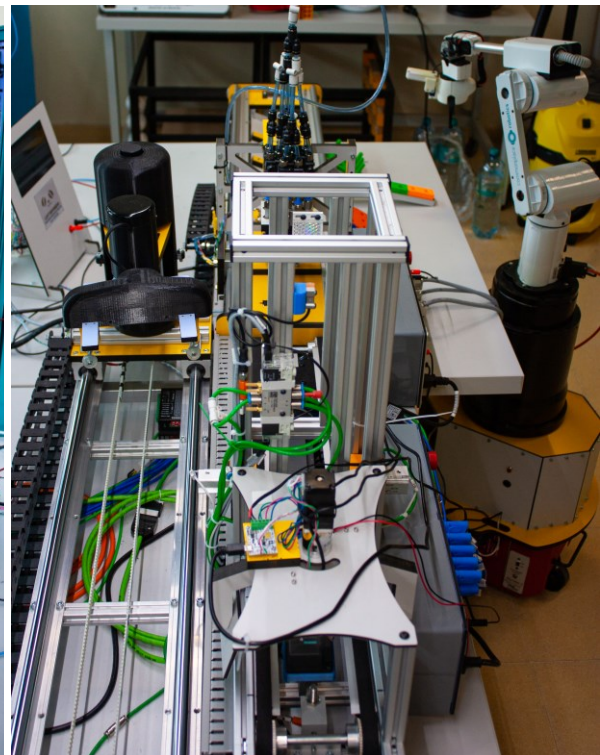
Deoarece cercetările au abordat strict procesul de fabricație flexibilă, se va lucra în continuare pe o structura hardware parțială - ISFM, dedicata numai fabricației flexibile. Zona de recuperare, reutilizare de componente, prin dezasamblare, manipulare, transport și recuperare de produse de către robotul mobil Pioneer, constituie o direcție viitoare de dezvoltare.



a)



b)



c)

Figura 13. a) IFMS_4.0_5.0 cu două fluxuri paralele, deservit de trei manipuloare robotice (ABB, FANUC, SCARA) și un robot mobil (PIONEER); b) Stația de dezasamblare din IFMS_4.0_5.0; c) Fabricația flexibilă deservită de sistemul robotic SCARA

Fiecare stație este controlată individual de un PLC. Toate PLC-urile sunt interconectate printr-o rețea ProfiNet prin care se asigură transmiterea rapidă a informațiilor între echipamente. Procesul de producție beneficiază de un sistem de decizie distribuit, care combină o decizie centralizată, subordonată obiectivului general al producției, cu decizii locale prin care se asigură realizarea duratelor de producție prestabilite.

Stația 1 a sistemului integrat de fabricație flexibilă (Figura 14), nu a suferit modificări hardware, ci doar modificări de natură software. Sarcina Stației 1 este de a plasa componenta *pallet* și de a scrie datele de producție pe tag-ul RFID. Fiind controlată de un PLC S7-1200 care recepționează și prelucrează semnalele transmise de senzori, amplasați pe conveyer,

Stația 1 trimite semnalele de control către elementele de execuție și către driverul de acționare a motorului. Pe conveior, se află magazia cu componente *pallet*, echipate cu tag-uri RFID. În plus, stația este dotată cu elemente de execuție pneumatice, care permit o acționare rapidă pentru eliberarea pieselor din stivă.

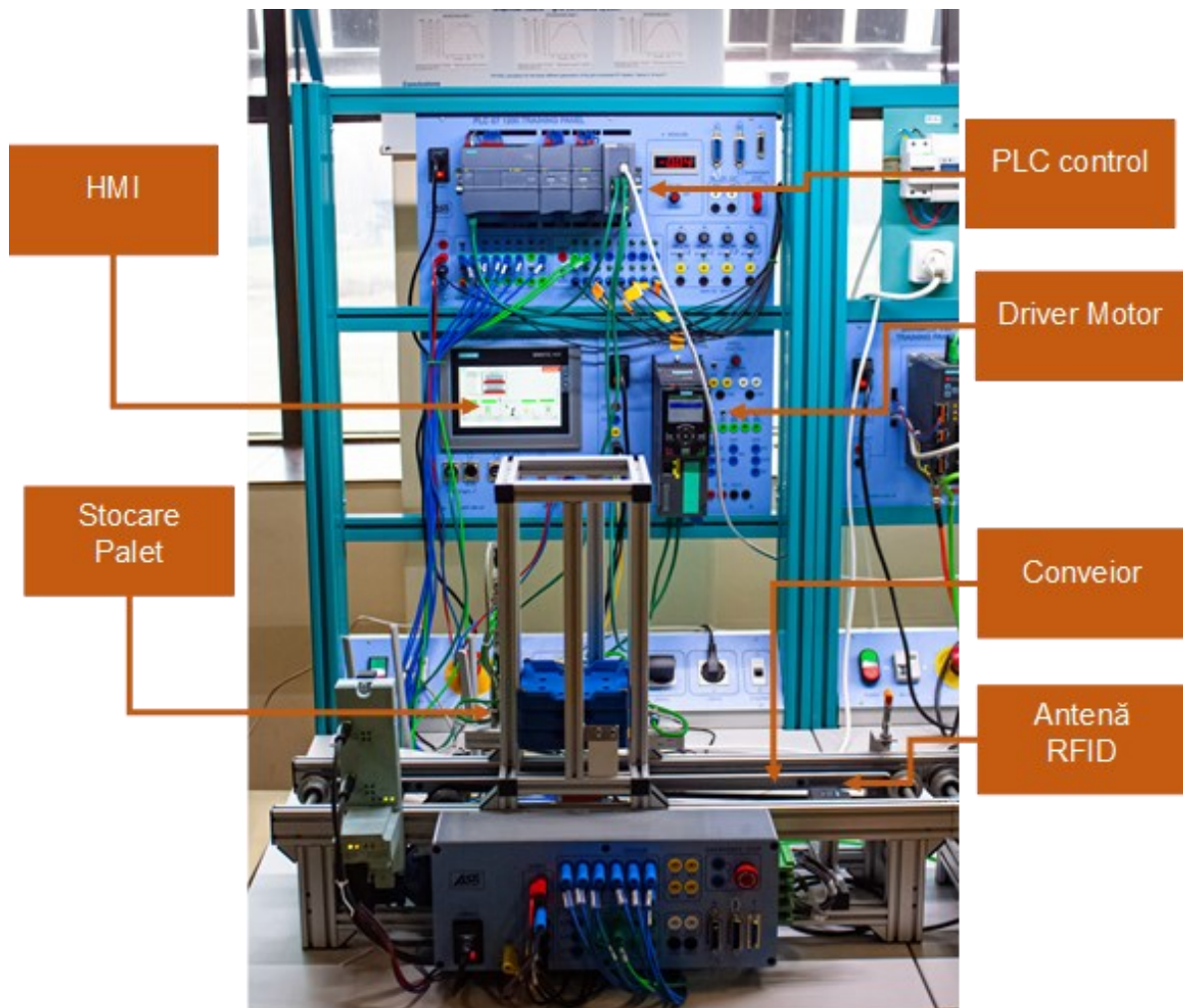


Figura 14. Stația 1 dedicată asamblării componentei *pallet*

Echiparea Stației 1 cu un HMI, permite operatorului introducerea datelor de producție, dar și monitorizarea informațiilor legate de producție. Operatorul poate introduce manual numărul, tipul de produse și ordinea de producție, pentru fabricația unui lot redus de produse. Aceste informații, transmise către PLC pentru a fi scrise pe tag-ul RFID al componentei *pallet*, conțin date specifice producției din stațiile următoare.

Stația 2 a sistemului de fabricație flexibilă (Figura 15) este responsabilă de plasarea componentei *base* pe *pallet*. În vederea realizării acestei operații, un PLC citește informațiile provenite de la senzori și acționează elementele de execuție. Stația 2 nu a necesitat modificări la nivelul hardware-ului sau software-ului, în raport cu sistemul inițial. Deoarece operația de asamblare, din Stației 2, nu a suferit modificări, dat fiind că plasarea componentei *base* este o operație comună tuturor tipologiilor de produse, Stația 2 păstrează structura hardware a configurației inițiale.

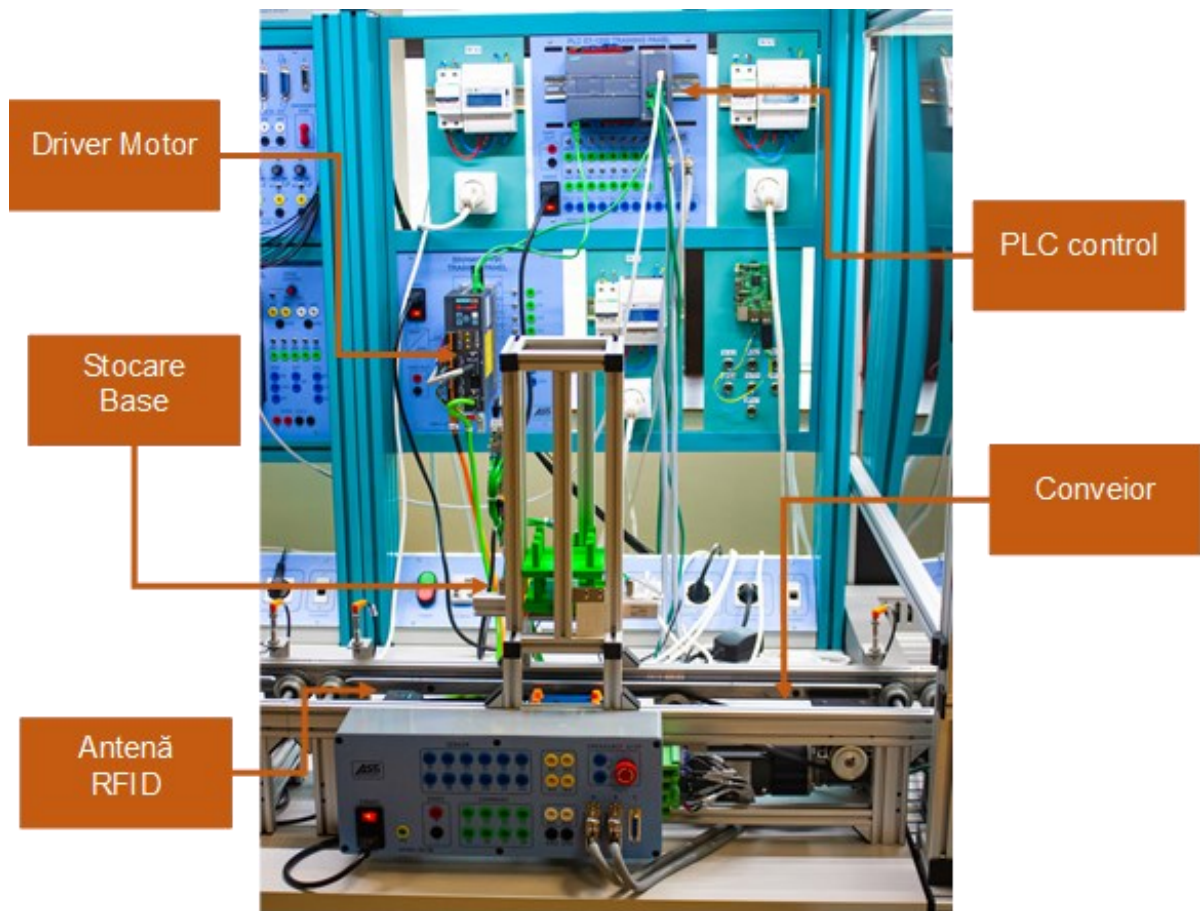


Figura 15. Stația 2 dedicată asamblării componentei *base*

În cadrul Stației 2, deoarece operațiile efectuate sunt comune tuturor tipurilor de produse, se înregistrează momentul de intrare a componentei *pallet* în stație și se verifică datele stocate pe eticheta RFID. Informațiile referitoare la momentul de intrare a produsului parțial asamblat în stații, pot fi utilizate pentru identificarea defecțiunilor survenite în cadrul sistemului de fabricație. Mai mult, aceste informații sunt utile în secvențele de optimizare a procesului de fabricație care se bazează pe monitorizarea duratelor de timp pe care un produs le petrece în fiecare stație. După plasarea componentei *base* a produsului pe *pallet* cu etichetă RFID, procesul de asamblare continuă prin Stația 3.

Stația 3 – FMC, este o stație nouă cu care a fost echipat IFMS. FMC poate participa la două procese paralele de fabricație, unul aferent fabricației în flux iar cel de-al doilea fabricației în celulă. Pentru a putea deservi ambele procese de asamblare, FMC este echipată cu magazii pentru depozitarea componentelor, plasate în imediata proximitate a manipulatorului ABB. Robotul industrial ABB permite realizarea unei multitudini de operații de asamblare. În cadrul acestei cercetări s-a considerat că robotul ABB deservește numai procesul de asamblare completă a unui produs Tip 1, în FMC. Această operație de asamblare este complet operată de către controlerul robotului, PLC-ul asigurând operațiile aferente procesului de fabricație flexibilă în flux și comunicația robotului cu sistemul de fabricație.

În cadrul fabricației flexibile în flux, în Stația 3 are loc consemnarea momentului de intrare a produsului parțial asamblat în stație, și tranzitarea Stației 3 prin transport pe conveior. După parcurgerea Stației 3 produsul așteaptă terminarea operației de asamblare din Stația 4 pentru realizarea transferului către această stație.

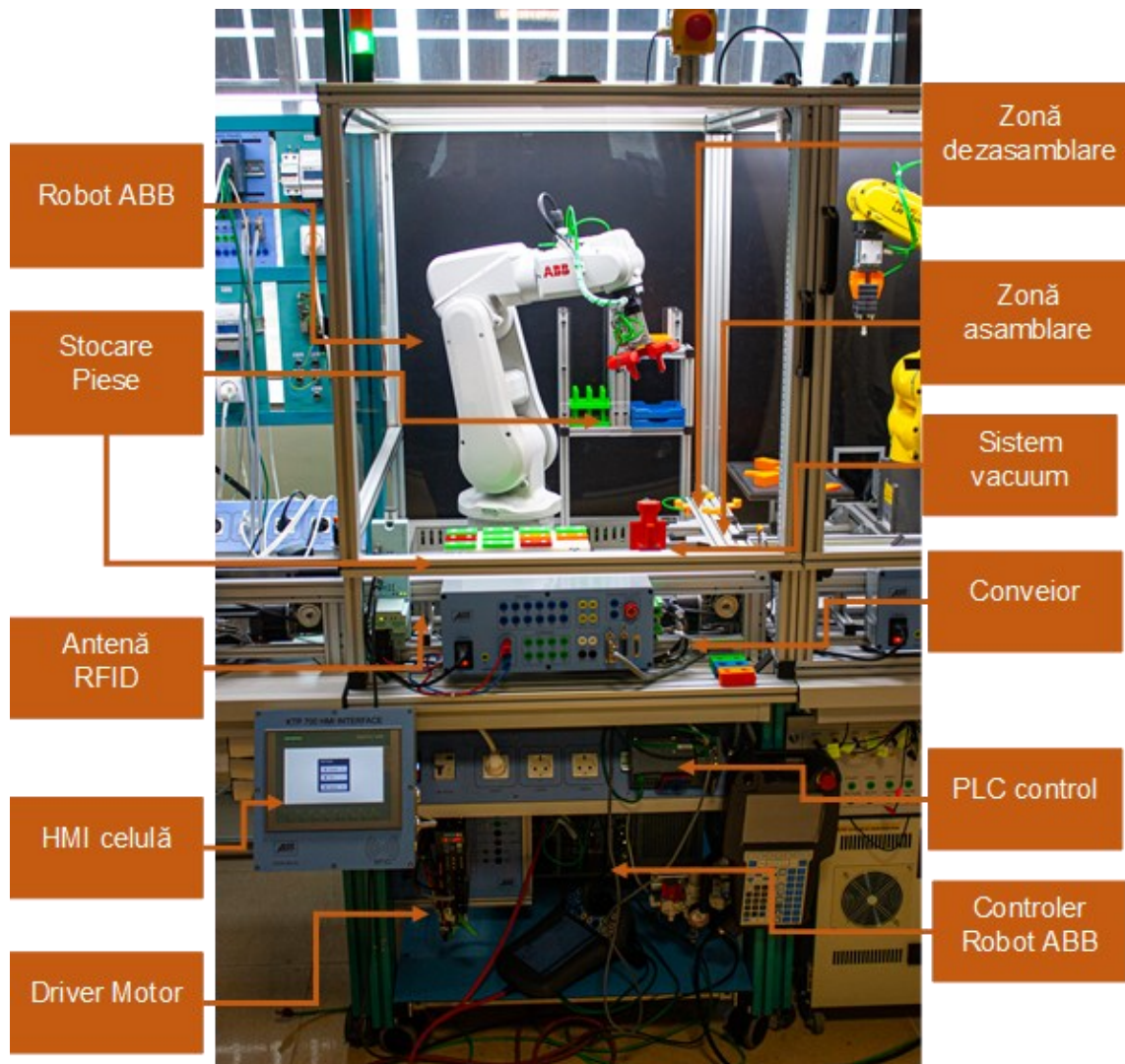


Figura 16. Stația 3 – Celula flexibilă echipată cu manipulator industrial ABB

În Stația 4 este realizată operația de asamblare a componentelor din stratul intermediar al produsului. Această asamblare presupune plasarea a maxim patru componente într-o configurație cerută de client. Pe lângă configurația de asamblare, componentele sunt de două tipuri în funcție de tipul de produs asamblat. Astfel, pentru produsele Tip 2, cu un singur strat intern, sunt asamblate componente *big parts*, componente *small parts* fiind asamblate pentru produsele multi-strat Tip 1. Pentru a putea plasa cu ușurință aceste componente, Stația 4 este echipată cu un braț robotic Fanuc. Manipulatorul FANUC este echipat cu un sistem de vacuum pentru prinderea componentelor, din orice poziție. În cadrul acestei stații, ambele tipuri de componente (*small și big parts*) sunt stocate aleator, fără a avea poziții dedicate. Pentru identificare tipului de componentă și a coordonatelor, robotul utilizează un sistem de identificare vizuală cu ajutorul unei camere integrate în zona de lucru. Datele preluate de către sistemul vizual sunt prelucrate în cadrul controler-ului robotului, astfel încât se realizează identificarea componentelor, preluarea și poziționarea acestora în locațiile dorite.

Poziția componentelor în stratul intermediar este preluată de pe tag-ul RFID. La intrarea produsului parțial asamblat în stație, din Stația 3 sau din Stația 5, prin întoarcerea produsului parțial asamblat, are loc citirea configurației produsului și scrierea momentului intrării în stație. Pe baza datelor privind configurația produsului, se vor transmite către robot, poziția componentelor în cadrul stratului, și informații despre componentele care necesită asamblare.

După realizare asamblării tuturor componentelor produsul este transportat către Stația 5 pentru continuarea operațiilor de asamblare.

Stația 5 (Figura 18) este dedicată plasării și fixării componentei *top* în poziția finală sau într-o poziție intermediară în funcție de tipul de produs. Astfel produsele Tip 2 conțin o singură componentă *top*, aflată în stratul final, pe când produsul Tip 1 conține două componente *top*, una în stratul intermediar și una în stratul final. Plasarea a două componente *top* în diferite straturi ale produsului, este realizată prin întoarcerea produsului parțial asamblat înapoi, la una dintre stațiile din fluxul de fabricație, pentru reluarea unei secvențe de operații.

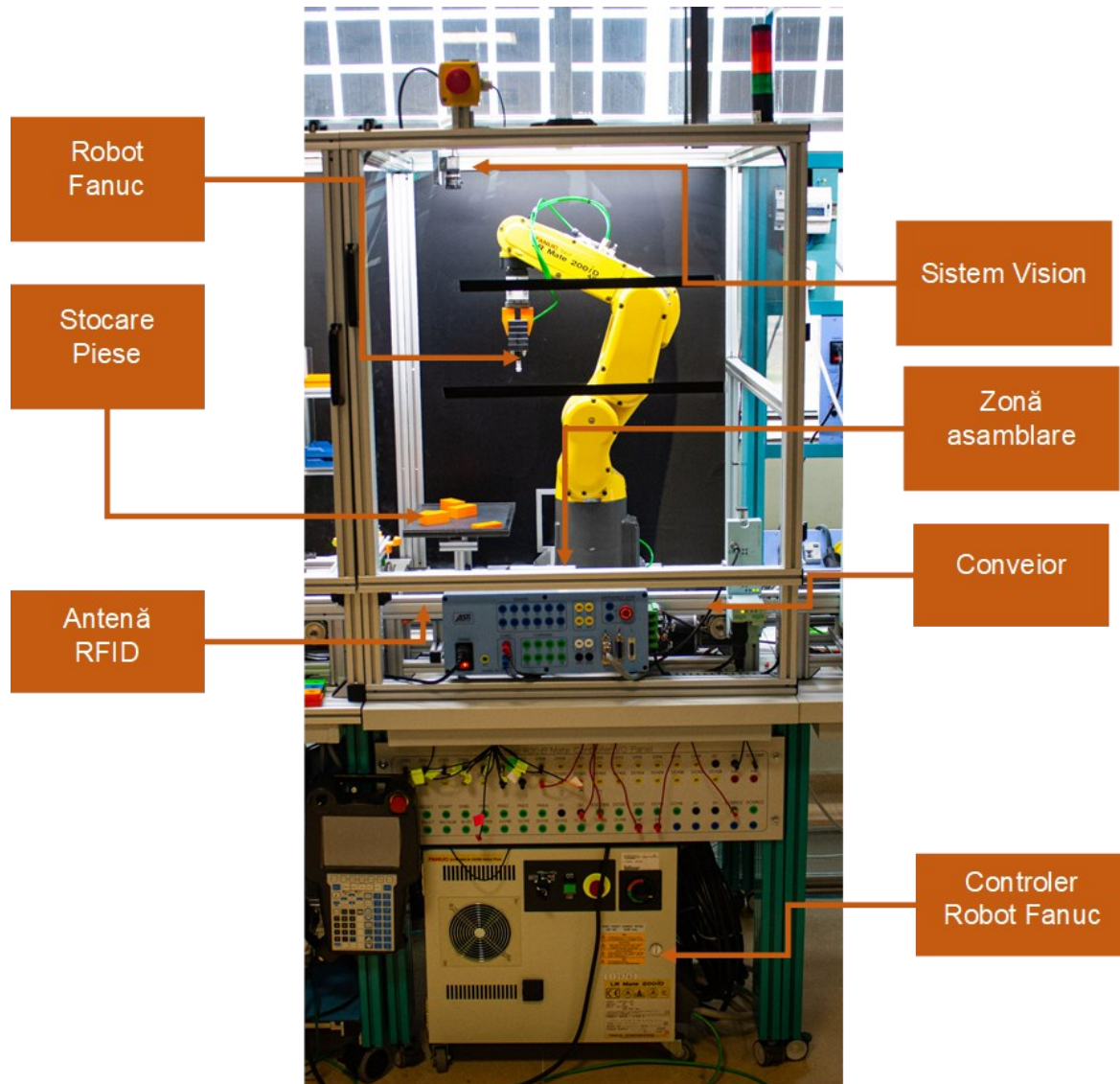


Figura 17. Stația 4 dedicată asamblării componentelor *big parts* și *small parts*

Asamblarea componentei *top* se realizează prin două operații de asamblare. Prima operație este de plasare și poziționare a unei componente *top*, prin preluare din stiva de componente a stației de lucru. Componenta *top* este poziționată pe componenta *base*, astfel se vor rigidiza toate straturile produsului. Cea de-a doua operație din cadrul procesului de asamblare este fixarea componentei *top*, prin presarea acestuia pe *base*. Această presare realizează o conexiune fixă între cele două componente, ceea ce permite manipularea ulterioară a produsului. După realizarea operației de presare, produsul este transportat în zona de așteptare a stației.

Identificarea produselor care necesită întoarcerea în fluxul de fabricație, se realizează pe baza informațiilor citite de pe tag-ul RFID, la intrarea produsului în stație. Astfel, produsul Tip 2 și produsul Tip 1 sunt transferate către Stația 6, dacă operația de asamblare a fost încheiată. Dacă produsul Tip 1 este la prima trecere prin flux, va fi transportat la Stația 4, pentru reluarea unei serii de operații de asamblare.

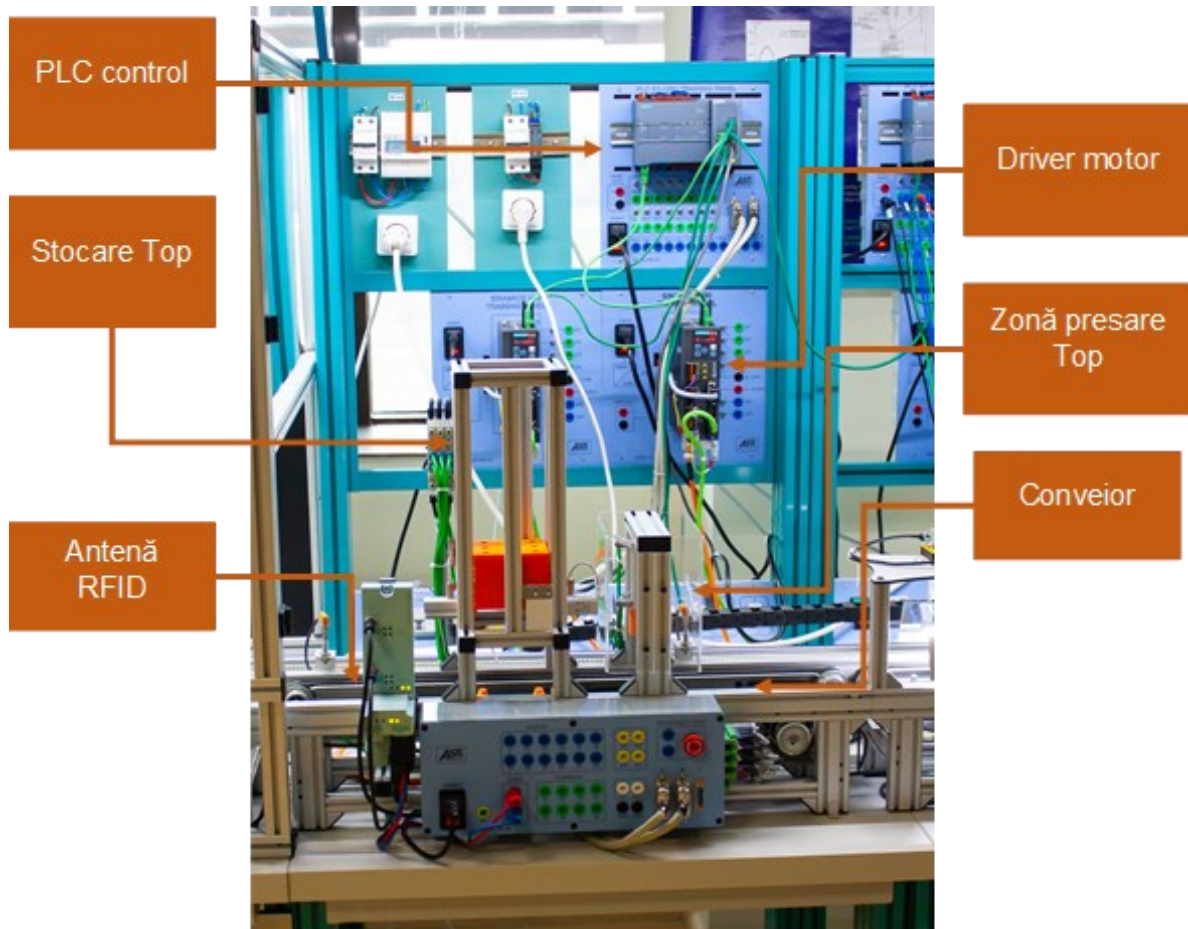


Figura 18. Stația 5 dedicată asamblării componentei *top*

Stația 6 (Figura 19) din IFMS este dedicată verificării produselor finite, prin efectuarea testului de calitate, urmat de stocarea produselor conforme în stivă. În cadrul testului de calitate sunt verificate produsele Tip 1 și Tip 2, realizate pe cele două fluxuri prin fabricația flexibilă în flux și fabricația flexibilă în celulă.

Procesul de verificare a calității produsului este de natură vizuală, produsul fiind scanat de o serie de camere care permit identificarea defectelor de structură sau de execuție din cadrul produsului. Pentru identificarea defectelor sunt citite date despre structura produsului, de pe tag-ul RFID. Pe baza structurii produsului se pot identifica defecte structurale ale produsului, de la lipsa unor componente, la defecte ale componentelor produsului.

Astfel dacă produsul este conform acesta este stocat în stiva Stației 6, în caz contrar este transporta spre dezasamblare în Stația 7 de dezasamblare, sau în Stația 3 pentru dezasamblare în celulă.

Pentru transportul produselor între stațiile aflate pe fluxul de fabricație, sau între celula pentru fabricația și stațiile de pe fluxul de fabricație, este utilizat un sistem de transport echipat cu un robot SCARA. Acest sistem de transport se deplasează pe un sistem de ghidaje orizontale, amplasate pe direcție paralelă cu linia de conectare în flux, a stațiilor IFMS. Acest lucru permite transferul între diferite stații, a produselor asamblate sau parțial asamblate. Acest

tip de transfer permite repetarea unei serii de operații de asamblare, fără a necesita operații complexe pentru întoarcerea pe conveior a produsului în fluxul de fabricație.

Comunicația dintre SRTS și stațiile sistemului de fabricație flexibilă este realizată cu protocolul *Profinet over Ethernet*, prin o conexiune *wireless*. Astfel, acest sistem este un sistem IoT din perspectiva Industriilor 4.0 și 5.0. Acest tip de comunicație permite o transmitere rapidă a informațiilor între stațiile de lucru și sistemul de transport. Întreg sistemul de transport a fost proiectat pentru a satisface condițiile de adaptare a fabricației inițiale, la fabricația flexibilă. Introducerea în sistemul de transport, a robotului SCARA, a fost determinată de necesitatea preluării și poziționării produselor, din diferite locații și cu diferite orientări. Un alt motiv pentru proiectarea unui astfel de robot este legat de constrângerile dimensionale, ale sistemului de fabricație și de operațiile colaborative, efectuate de roboții integrați în sistemul de fabricație.

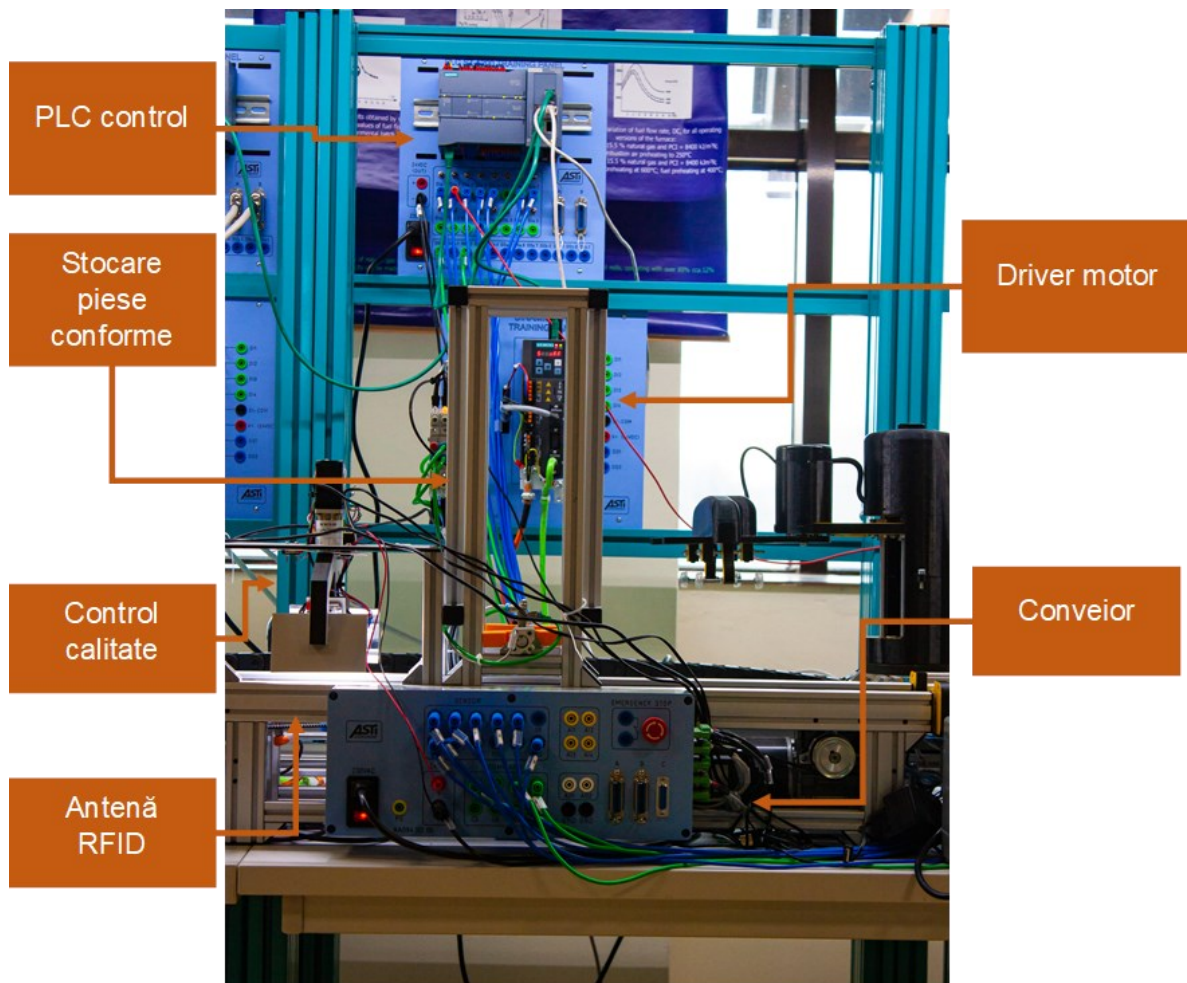


Figura 19. Stația 6 dedicată controlului de calitate (QC) și stocării produselor conforme

Pentru atingerea obiectivelor propuse, a post proiectat sistemul robotic SCARA echipat cu manipulator (Figura 20). Acesta este compus din următoarele componente: rulmenți liniari deschiși (1), ghidaj linear cu suport de susținere (2), brațe gripper (3), sistem de transmisie liniară (4), servomotor pentru acționarea gripper-ului (5), motor pas cu pas pentru acționarea joncțiunii braț-gripper (6), driver pentru comanda precisă a motorului pas cu pas (7), motor pas cu pas pentru poziționarea gripper-ului în plan vertical (8), ghidaje liniare (9), rulmenți liniari (10), senzori de poziție (11), motor pas cu pas pentru poziționarea gripper-ului în plan orizontal (12) și un sistem de transmisie pe curea (13). Această proiectarea detaliată a sistemului, a condus la implementarea sistemului robotic, capabil să execute operații precise, de manipulare și transport.

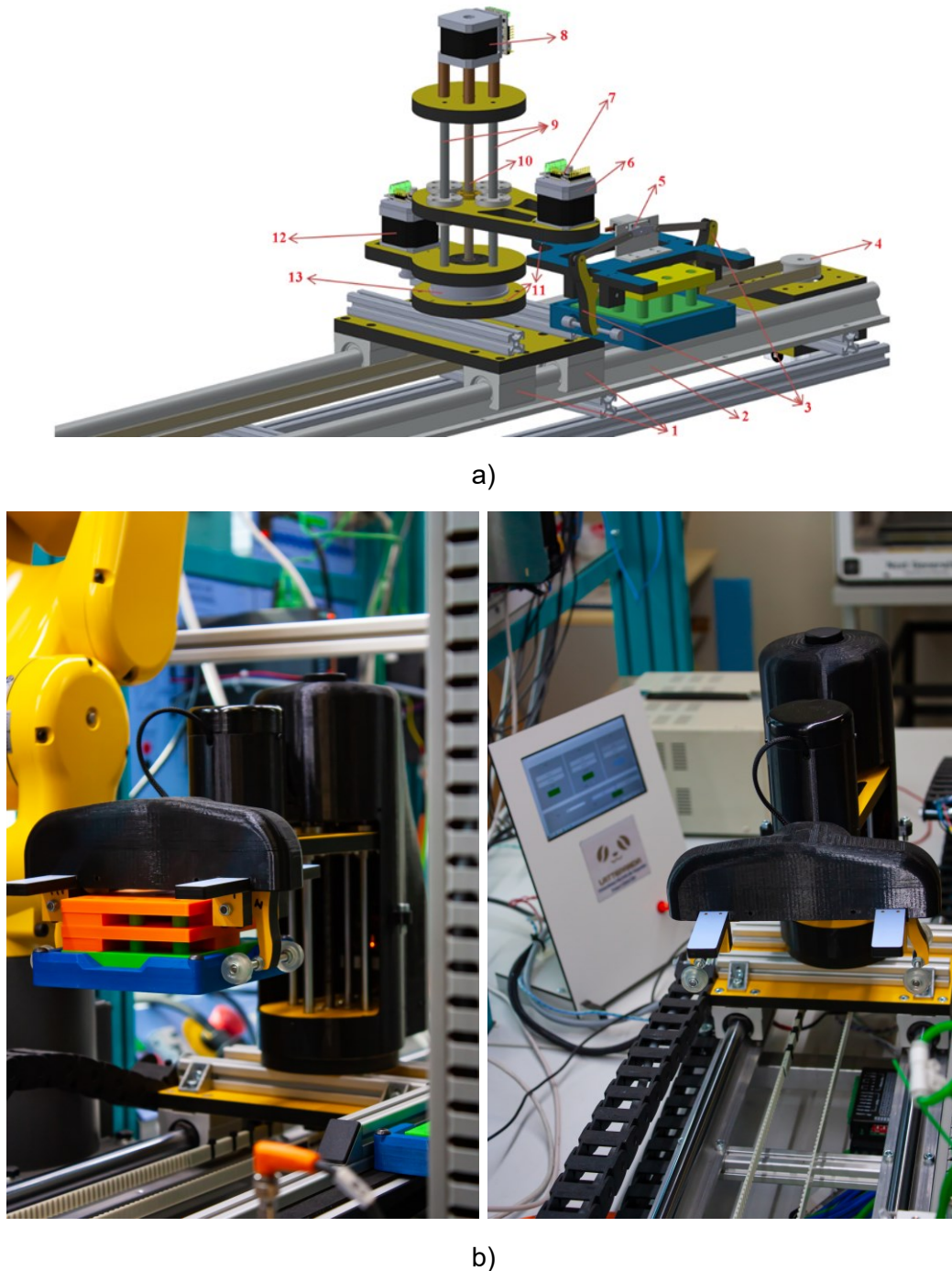


Figura 20. a) Modelul Solidworks al SRTS; b) Fabricație flexibilă deservită de sistemul robotic SCARA

1.4. Rezultate și contribuții științifice

În acest capitol, s-au realizat proiectarea tehnologică, proiectarea hardware și implementarea tehnicilor de adaptare a unei linii de producție pentru fabricația în flux, la un sistem integrat pentru fabricația flexibilă. Prin aplicarea tehnicilor de adaptare, s-a implementat sistemul integrat pentru fabricația flexibilă care are în componența hardware șapte stații controlate independent, interconectate informațional prin comunicație Profinet. Sistemul integrat pentru fabricația flexibilă poate lucra atât ca sistem destinat fabricației

produselor cu tipologie unică, dar și ca sistem cu capacitate de adaptare la diferite tipologii de produse, din gama de fabricație.

Astfel, IFMS integrează două subsisteme de producție, cu fluxuri paralele de fabricație. IFMS este deservit de trei manipuloare robotice. Fabricația flexibilă este posibilă prin echiparea sistemului cu un sistem robotic suplimentar, destinat operațiilor de manipulare și transport. Având în vedere potențialul de asamblare simultană a produselor (atât pe linie cât și în celulă), a rezultat un sistem cu capacitate de producție superioară.

În proiectarea și implementarea tehnicilor de adaptare a unei linii de producție în flux, la un sistem integrat de fabricație flexibilă, s-au parcurs câteva etape în elaborarea tehnologiei de adaptare: • analiza și modelarea sistemului de fabricație în flux destinat fabricației produselor cu tipologie unică; • analiza structurii și tehnologiei de execuție a produselor, derivate structural din produsul inițial; • proiectarea hardware și implementarea tehnicilor de adaptare a liniilor pentru fabricația în flux, a produselor cu tipologie unică, la sistemul integrat pentru fabricația flexibilă.

Sistemul integrat pentru fabricația flexibilă a fost proiectat să răspundă conceptului de fabricație totală, prin proiectarea și implementarea funcțiilor de asamblare totală, dezasamblare completă, recuperare și reutilizare de componente. Astfel, s-a propus o structură hardware complet echipată, din punct de vedere al capacităților de fabricație flexibilă și al recuperării și reutilizării de componente, IFSM_4.0_5.0.

Sistemul IFSM_4.0_5.0 propus are în componență șapte stații dispuse în conexiune liniară, deservite de trei sisteme robotice, conectate funcțional la IFSM (ABB, FANUC, SCARA) și un robot mobil autonom Pioneer. Această structură hardware, este subordonată conceptelor specifice Industriilor 4.0 și 5.0, prin automatizarea totală a proceselor și echipamentelor, destinată realizării, în condiții de performanță și eficiență economică, a operațiilor de asamblare, dezasamblare (Industrie 4.0) și recuperare, reutilizare a componentelor (Industrie 5.0). Proiectarea conducerii proceselor și a sistemelor robotice, s-a bazat pe interfațarea informațională a rezultatelor simulării modelelor RPS digitale, cu conducerea în timp real a proceselor, realizată prin aplicarea conceptului *Digital twin*. Mai mult, comunicația sistemului robotic SCARA și a robotului mobil Pioneer, cu subprocese din IFSM, are la bază comunicația performantă prin *IoT*.

Prin adoptarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0, sistemul de fabricație este pus în relație cu aspecte care țin de intervenția în proces, a operatorilor și clienților. IFSM_4.0_5.0 este dotat cu HMI, prin care operatorii introduc secvențe de fabricație și monitorizează parametrii de funcționare ai sistemului. În mod similar, clientul participă la procesul de fabricație, deoarece fiecare produs este personalizat, în funcție de cerințele sale. Prin fabricația produselor personalizate, se promovează o fabricație sustenabilă, care furnizează produse personalizate în acord cu nevoile și preferințele clienților. Aceasta conduce la o utilizare eficientă și durabilă a resurselor.

În această secțiune au fost atinse obiectivele specifice **obiectivului general OB.1**. Proiectarea și implementarea tehnicilor de adaptare a unei linii de producție dedicată fabricației în flux, la un sistem integrat pentru fabricația flexibilă, cu integrarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0. Astfel, rezultatele obținute se aliniază direcțiilor de cercetare pentru atingerea obiectivelor: **OB.1.1**. Proiectarea tehnicilor de adaptare hardware a unei linii pentru fabricația în flux, la linie dedicată fabricației flexibile, cu aplicarea conceptelor Industriei 4.0 și 5.0; **OB.1.2**. Proiectarea structurii hardware a sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, dedicat asamblării flexibile în linie și în celulă, cu aplicarea conceptelor Industriei 4.0 și 5.0.

Realizarea conceptuală și hardware a *Sistemului integrat pentru fabricația flexibilă cu attribute specifice Industriilor 4.0 și 5.0*, constituie o contribuție științifică semnificativă cu impact major în ceea ce privește diversificarea capacităților de producție și creșterea productivității, cu costuri minime. Prin utilizarea unei structuri hardware inovatoare, acest sistem demonstrează angajamentul față de principiile de sustenabilitate și economie circulară, promovate de Industria 5.0. Sistemul integrat pentru fabricația flexibilă, bazat pe convergența resurselor fizice cu cele cibernetice, integrează conceptul de fabricație totală prin implementarea unui ciclu operațional complet, prin operațiile de asamblare, verificare a calității, dezasamblare, recuperare și reutilizare a componentelor. Astfel se asigură *sustenabilitatea* sistemului de producție, componentă a Industriei 5.0 care se concentrează pe reutilizarea și reciclarea resurselor naturale, reducerea deșeurilor și a impactului asupra mediului. Structura hardware propusă, cu două fluxuri paralele de lucru, asigură *reziliența* fabricației, prin capacitatea de comutare a producției la fluxul alternativ, atunci când se identifică o avarie pe fluxul principal. Astfel, prin structura hardware propusă, se asigură fabricația continuă, subordonând astfel propunerea conceptului de *reziliență* a producției, specific Industriei 5.0.

Modelarea dinamicii sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, din perspectiva conducerii cu Digital twin

-
- 2.1. Modelarea cu RPS a dinamicii sistemului integrat pentru fabricația flexibilă cu două fluxuri de producție paralele
 - 2.2. Modelarea cu RPS a proceselor de fabricație/asamblare flexibilă în stații
 - 2.2.1. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 1
 - 2.2.2. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 2
 - 2.2.3. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 3
 - 2.2.4. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 4
 - 2.2.5. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 5
 - 2.2.6. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 6
 - 2.3. Rezultate și contribuții științifice
-

Pentru modelarea conducerii procesului de fabricație flexibilă se vor utiliza instrumente specializate în modelarea proceselor a căror dinamică este determinată de evenimente discrete, respectiv Rețele Petri (RP). Se vor utiliza tipologii de RP în acord cu tipul procesului considerat, complexitatea acestuia, precum și cu modul de interconectare a acestuia cu subprocesele [84]. Astfel, pentru modelarea proceselor de asamblare/dezasamblare în stațiile de lucru, se vor utiliza RP temporizate (RPT) și RP sincronizate (RPS). Modelele RPS vor fi utile în aplicarea conceptului *Digital twin* la implementarea conducerii în timp real [85].

Utilizarea conceptului Digital twin, și a altor concepte specifice Industriilor 4.0 și 5.0, se bazează pe modelele digitale ale proceselor, care reflectă proprietățile și funcționarea acestora cu acuratețe sporită. În acest sens, conceptul *Digital twin* este aplicat pentru analiza interacțiunii subsistemele, în cadrul dinamicii procesului. Prin această abordare la nivel de subproces, se realizează analize precise ale sincronizărilor, identificarea posibilelor întârzieri, determinarea unor strategii de conducere care să contribuie la îmbunătățirea eficienței și performanțelor procesului.

Modelarea dinamică pe baza *Digital twin*, permite reprezentarea stărilor și a comportamentului procesului, precum și identificarea structurilor decizionale, dacă modelul nu este strict determinist. [86]. Modelele de tip RPT permit ca, prin simulări repetate, bazate pe scenarii de evoluție ale procesului, să se realizeze în urma analizei, soluționarea blocajelor - *deadlock* cauzate de partajarea resurselor, și a gâtuirilor - *bottleneck* pentru operații cu durate mari de realizare, deservite de resurse insuficiente.

2.1. Modelarea cu RPS a dinamicii sistemului integrat pentru fabricația flexibilă cu două fluxuri de producție paralele

Plecând de la proiectarea sistemelor și proceselor de fabricație flexibilă în flux și în celulă, modelul sistemului integrat de fabricație flexibilă poate fi reprezentat de rețeaua Petri sincronizată

$$RPS_{FMS} = \langle RPT_{FMS}, E_{FMS}, Sync_{FMS} \rangle. \quad (2.1)$$

În care partea temporală a modelului este definită de

$$RPT_{FMS} = \langle P_{FMS}, T_{FMS}, I_{FMS}, O_{FMS}, m_{0_FMS}, temp_{FMS} \rangle. \quad (2.2)$$

În cadrul modelului temporal mulțimea stărilor rețelei este reprezentată de $P_{FMS} = \{P_{lasmb}, P_{casmb}, P_{dataT1}, P_{dataT2}, P_{ctrFMS}\}$ unde componentele sunt:

$P_{lasmb} = \{P_i\}_{i=1,21}$ - mulțimea stărilor care modelează fabricația flexibilă în flux atât pentru produsele de Tip 1 cât și de Tip 2,. În cazul procesului de producție de Tip 1 este inclus și transportul produsului de la ieșirea din Stația 5 până la intrarea în Stația 4;

$P_{casmb} = \{P_j\}_{j=22,29}$ - mulțimea stărilor asociate fluxului de producție în celulă, care include atât operația de fabricație din celula Stației 3, cât și transportul produsului de la sistemul de fabricație flexibilă în celulă până la punctul de control al calității, situat la intrarea în Stația 6;

$P_{dataT1} = \{P_k\}_{k=30,39}$ - reprezintă mulțimea stărilor discrete asociate fluxului de date al produsului de Tip 1, care se desfășoară în paralel cu fluxul de producție și interacționează cu acesta;

$P_{dataT2} = \{P_k\}_{k=40,51}$ - reprezintă mulțimea stărilor discrete asociate fluxului de date al produsului de tip 2, care operează în paralel cu fluxul de producție. Aceasta include pozițiile necesare pentru returnarea produsului la Stația 4 și transmiterea informațiilor relevante despre produs înapoi la aceasta;

$P_{ctrFMS} = \{P_c\}_{c=52,64}$ - reprezintă mulțimea stărilor discrete asociate deciziilor privind disponibilitatea resurselor, pentru fabricația în flux sau de fluxului informațional.

Mulțimea tranzițiilor rețelei este reprezentată de $T_{FMS} = \{T_{lasmb}, T_{casmb}, T_{dataT1}, T_{dataT2}\}$, unde:

$T_{lasmb} = \{T_i\}_{i=1,19}$ - reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate procesului de fabricație flexibilă în flux, care includ atât operațiunile de asamblare în celula Stației 3 pentru produsele de Tip 2, cât și transportul produselor de Tip 1 de la ieșirea din Stația 5 până la intrarea în Stația 4 pentru a fi supuse unui nou set de operațiuni de asamblare;

$T_{casmb} = \{T_j\}_{j=20,26}$ - reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate procesului de fabricație flexibilă în celulă, care includ transportul produselor finite la punctul de control al calității pentru a fi verificate;

$T_{dataT1} = \{T_k\}_{k=27,34}$ - reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate fluxului de informații pentru produsul de Tip 1;

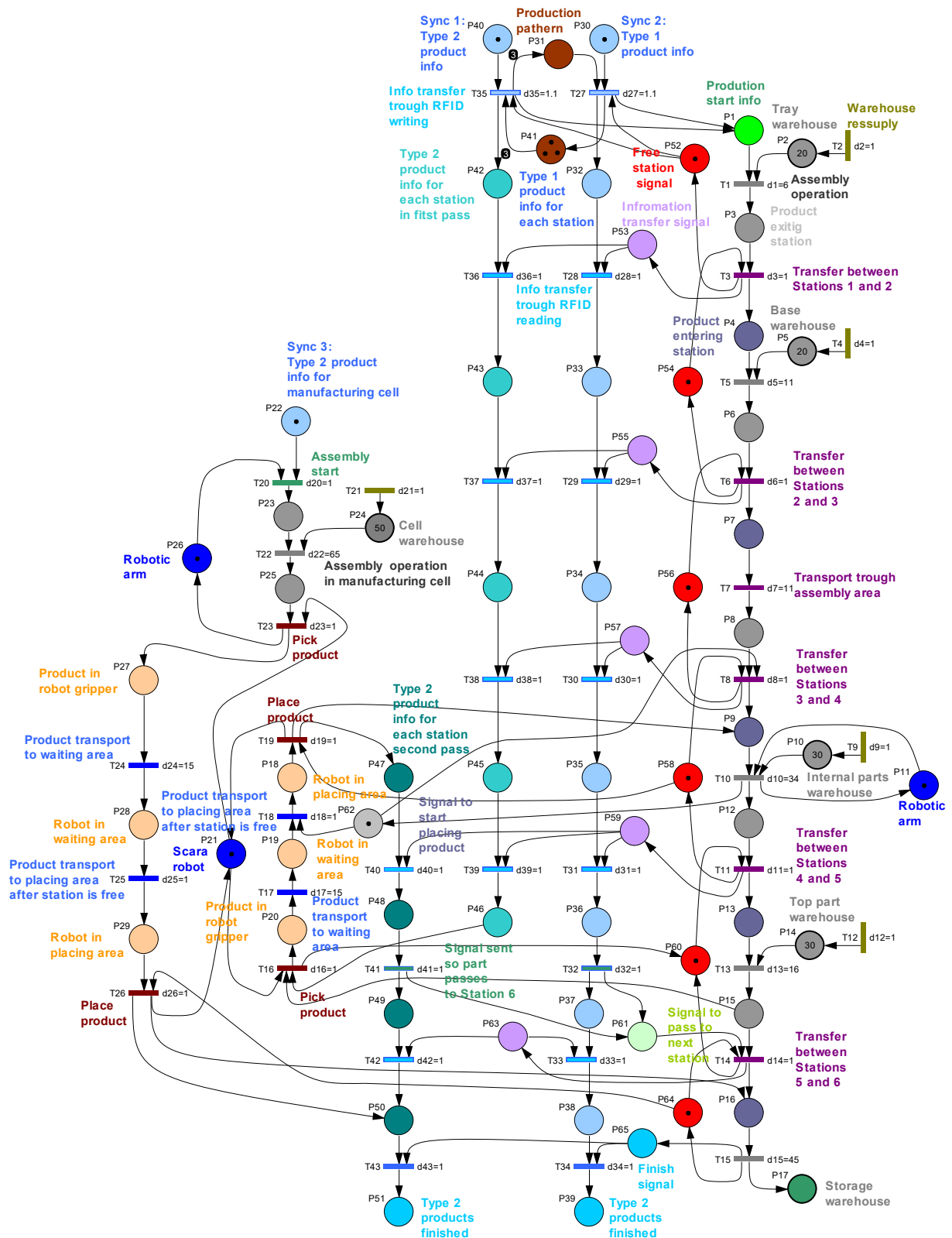


Figura 21. Modelul RPS asociat fabricației flexibile pe un sistem de producție, cu două fluxuri paralele

$T_{dataT_2} = \{T_v\}_{v=35,51}$ - reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate fluxului de informații pentru produsul de Tip 2.

Funcția de ponderare a arcelor de intrare reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$I_{FMS} : (P_{FMS} \times T_{FMS}) \rightarrow Q_+ . \quad (2.3)$$

Funcția de ponderare a arcelor de ieșire reprezintă ponderile arcelor care în cadrul modelului conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$O_{FMS} : (T_{FMS} \times P_{FMS}) \rightarrow Q_+ . \quad (2.4)$$

Temporizările asociate tranzițiilor modelului RPT sunt definite prin

$$temp_{FMS} : T_{FMS} \rightarrow Q_+ \cup \{0\} . \quad (2.5)$$

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje asociat stărilor inițiale, este reprezentat de

$$m_{0_FMS} : P_{FMS} \rightarrow Q_+ \cup \{0\} . \quad (2.6)$$

Evenimentele externe, reprezentate de E_{dFMS} , integrează semnalele externe de sincronizare utilizate în controlul procesului de fabricație

$$E_{dFMS} = \{E_{dFMS}^1, E_{dFMS}^2, E_{dFMS}^3\} \cup \{e_{FMS}\} . \quad (2.7)$$

Funcția $Sync_{FMS}$ reprezintă asocierile dintre un set de tranziții și setul de evenimente externe:

$$Sync_{FMS} : \{T_{20}, T_{27}, T_{35}\} \rightarrow \{E_{FMS}^1, E_{FMS}^2, E_{FMS}^3\} \cup \{e_{FMS}\} , \quad (2.8)$$

unde " e_{FMS} " reprezintă evenimentul neutru încorporat în monoidul E_{dFMS}^* . Astfel pentru $Sync_{FMS}$ se definesc componentele:

$$\begin{aligned} Sync1_{FMS} &: T_{35} \rightarrow \{E_{dFMS}^1\} \\ Sync2_{FMS} &: T_{27} \rightarrow \{E_{dFMS}^2\} , \\ Sync3_{FMS} &: T_{20} \rightarrow \{E_{dFMS}^3\} \end{aligned} \quad (2.9)$$

unde:

$E_{dFMS}^1 = Sync1_{FMS}$ - reprezintă semnalul de sincronizare utilizat pentru transmiterea informațiilor aferente produsului Tip 2, de la algoritmul de planificare a fabricației, către procesul de fabricație flexibilă în flux;

$E_{dFMS}^2 = Sync2_{FMS}$ - reprezintă semnalul de sincronizare utilizat pentru transmiterea informațiilor asociate produsului Tip 1, de la algoritmul de planificare a fabricației, către procesul de fabricație flexibilă în flux;

$E_{dFMS}^3 = Sync3_{FMS}$ - reprezintă semnalul de sincronizare utilizat pentru transmiterea informațiilor asociate produsului Tip, 1 de la algoritmul de planificare a fabricației, către procesul de fabricație flexibilă în celulă.

Pornind de la modelul RPS, se poate realiza simularea procesului de producție pe ISFM. În Figura 22 se prezintă rezultatele simulării fabricației flexibile pe cele două fluxuri paralele de producție. Simularea oferă rezultate relativ la fabricația produselor Tip 1, pe fluxul FMC, și fabricația produselor cu tipologie hibridă, Tip 1 și Tip 2, pe fluxul FFM.

Din rezultatele simulării rezultă momentul în care produsul, fabricat în FMC, ajunge în Stația 5, de este va fi preluat și transportat în zona de control al calității. Concomitent, produsul fabricat în pe FFM staționează în zona de preluare din Stația 5, oferind prioritate de acces produselor de pe fluxul paralel.

Conducerea IFMS implementează restricția de prioritate a accesului în Stația 5: dacă la intrarea Stației 5 ajung cele două produse, fabricate pe fluxurile paralele, prioritate are produsul de pe fluxul FMC, dacă pe FFM este în lucru un produs Tip 1. Această strategie de conducere, asigură minimizarea timpilor de așteptare din întregul IFMS. Figura 22 ilustrează transportul produsului Tip 1 din Stația 5, înapoi la Stația 4, cu SRTS.

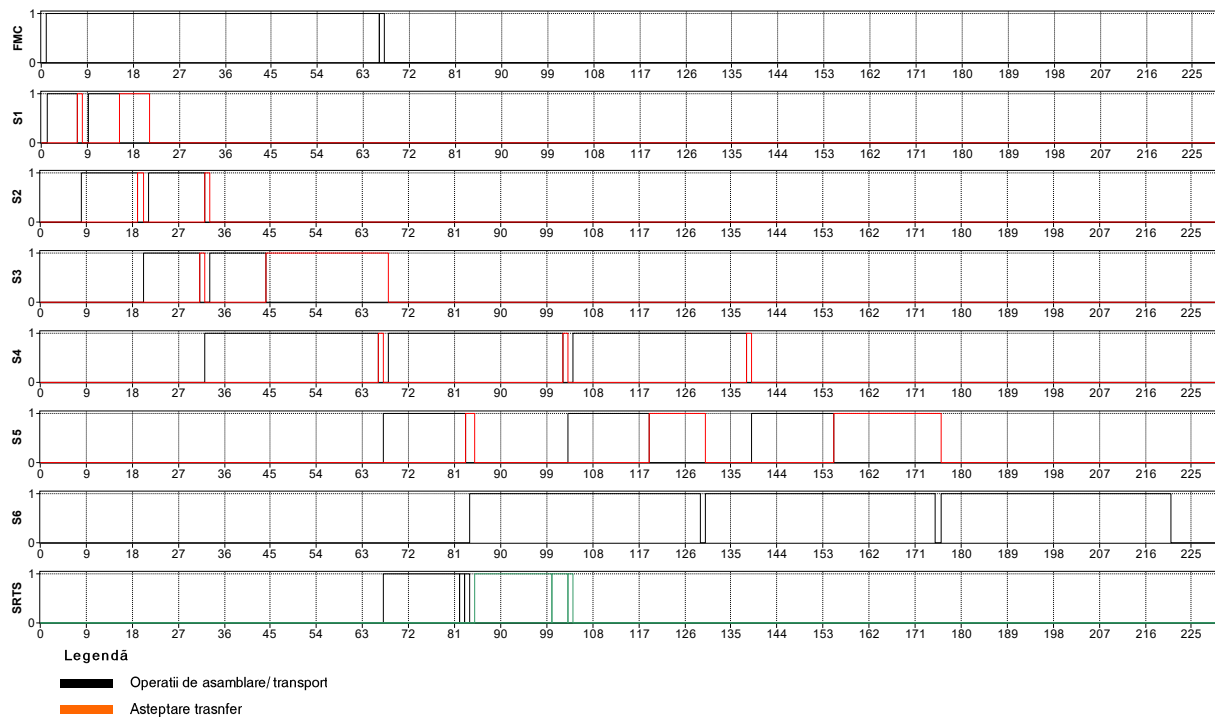


Figura 22. Rezultatele simulării modelului RPT asociat IFMS

Similar, acest transport poate induce timpuri de așteptare în Stația 3, din cauza restricțiilor de prioritate, prestabilite, pentru accesului la Stația 4. Accesul în Stația 4, oferă prioritate produselor transportate cu SRTS, în timp ce produsul de pe fluxul FFM va staționa în Stația 3. Timpurile de așteptare sunt introduși în stațiile care au duratele de producție mai mici decât cea mai mare durată de producție. Ei nu pot fi minimizați sau eliminați, din cauza strategiei de conducere a IFMS.

Prin simulări se evaluează timpurile de așteptare, sincronizări ale operațiilor derulate pe cele două fluxuri paralele de producție și apariția blocajelor. În conducerea procesului, pentru stațiile aflate la convergența celor două fluxuri de producție, se respectă restricțiile de prioritate care sunt destinate evitării coliziunilor, respectiv blocajelor.

2.2. Modelarea cu RPS a proceselor de fabricație/asamblare flexibilă în stații

Deoarece fiecare stație de lucru a sistemului de fabricație operează în mod autonom, fiind echipată cu propriul PLC, este necesară modelarea fiecărei stații ca un proces independent. La modelarea cu rețele Petri a unei stații de lucru se vor considera toate operațiile fizice: asamblare, dezasamblare, manipulare, transport precum și informații tehnice privind

diferite restricții, durate ale operațiilor, disponibilitatea resurselor, semnale de sincronizare declanșate de interoperabilitatea stației curente cu celelalte conectate în flux.

În următoarele subcapitole, se vor prezenta modele RPT corespunzătoare fiecărei stații urmând a se identifica implicațiile rezultatelor simulării în proiectarea și implementarea conducerii IFMS.

2.2.1. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 1

În Stația 1 a sistemului de fabricație flexibilă, se inițiază procesul de asamblare a produsului prin plasarea pe sistemul de transport a unei *pallet* echipate cu un tag RFID (Figura 23). Eticheta RFID asigură înregistrarea, citirea și transmiterea datelor tehnice între stații, fără a fi necesară o comunicare sincronizată între acestea.

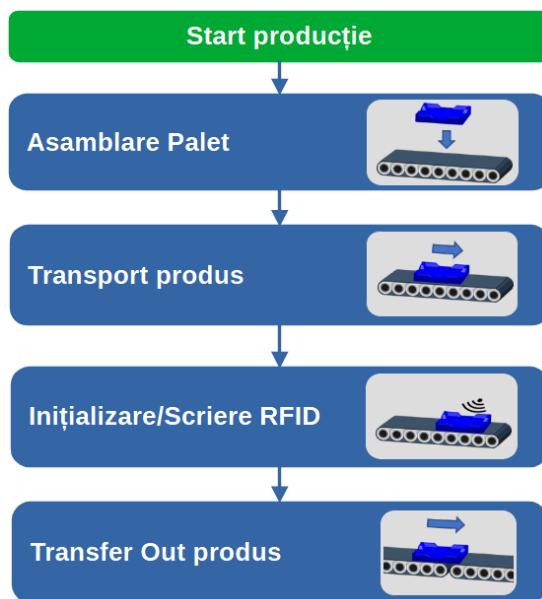


Figura 23. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației din Stația 1

Generic modelul unei stații de lucru are tipologie specifică de Rețea Petri Sincronizată:

$$RPS_{S1} = \langle RPT_{S1}, E_{dS1}, Sync_{S1} \rangle, \quad (2.10)$$

în care RPT este modelul cu tipologie RPT

$$RPT_{S1} = \langle P_{S1}, T_{S1}, I_{S1}, O_{S1}, m_{0S1}, temp_{S1} \rangle. \quad (2.11)$$

În cadrul RPT_{S1} mulțimea pozițiilor rețelei reprezentată de $P_{S1} = \{P_{ctS1}, P_{aS1}, P_{dataS1}, P_{whS1}\}$ este compusă din:

$P_{ctS1} = \{P_i\}_{i=\overline{10,11}} \rightarrow$ reprezintă mulțimea stărilor asociate semnalelor de monitorizare a disponibilității intercondiționate a stațiilor. Aceste semnale sunt corelate cu momentele de început și sfârșit al fabricației în Stația 1, care se vor sincroniza cu momentul de start al fabricației în Stația 2. Pentru a valida prezența unei singure piese într-o stație, un semnal de monitorizare asociat disponibilității stației, este preluat la intrarea unei piese în stație și eliberat la ieșirea din stație;

$P_{aS1} = \{P_j\}_{j=\overline{7,8}} \rightarrow$ reprezintă mulțimea stărilor asociate stadiilor succesive ale produsului aflat în curs de asamblare;

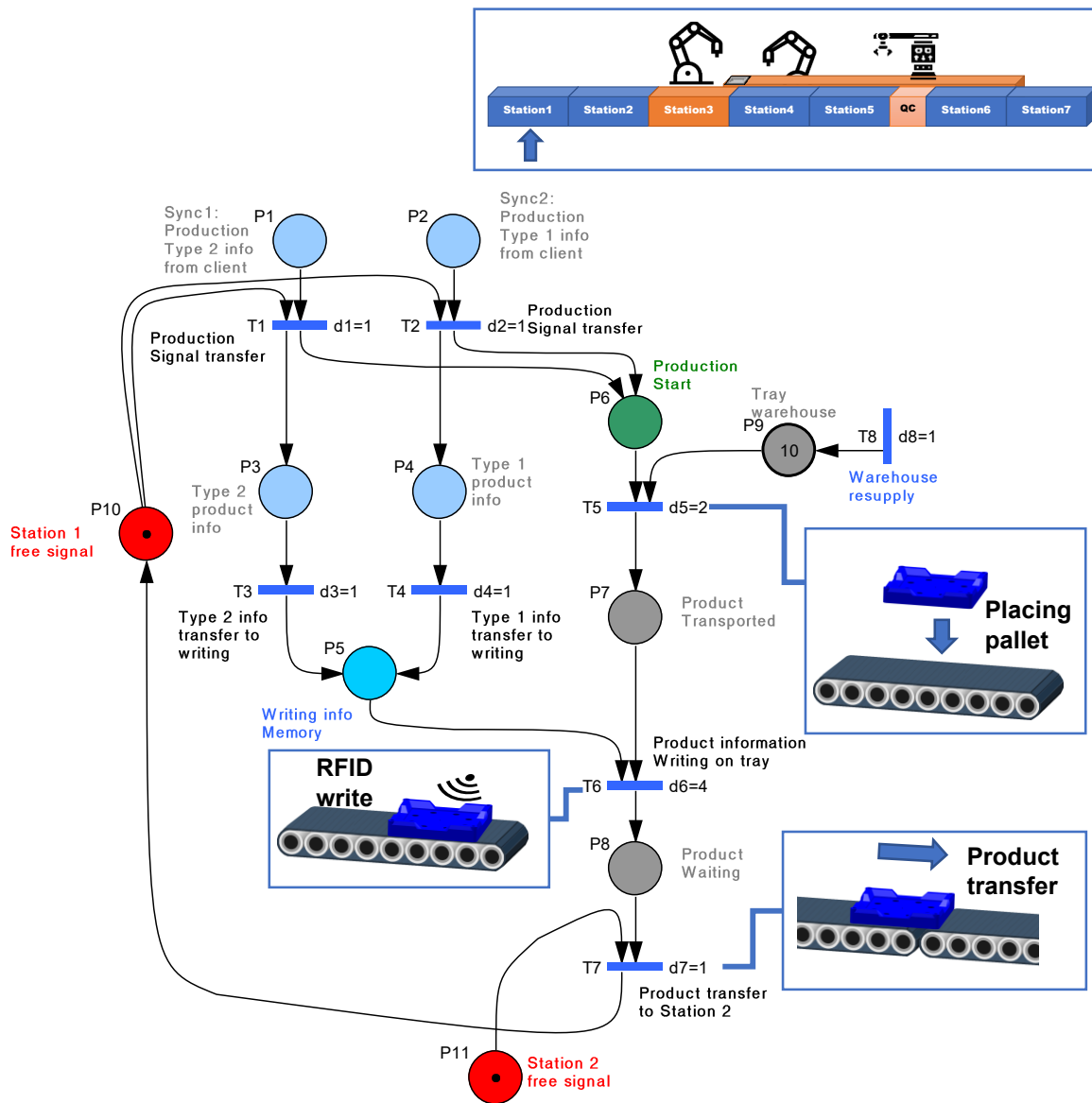


Figura 24. Modelul RPS asociat procesului de fabricație din Stația 1

$P_{dataS1} = \{P_k\}_{k=1,6}$ → reprezintă mulțimea pozițiilor asociate stărilor succesive ale conținutului etichetei RFID. Aceste informații sunt scrise și transmise în Stația 1 pe tag-ul RFID la inițializarea fabricației;

$P_{whS1} = \{P_9\}$ → reprezintă mulțimea stărilor succesive ale depozitului de componente (magazie) al stației de lucru.

Mulțimea tranzițiilor modelului RPS este reprezentată de $T_{S1} = \{T_{as1}, T_{dataS1}, T_{ress1}\}$ unde:

$T_{as1} = \{T_i\}_{i=5,7}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete corespunzătoare operațiilor din Stația 1. Acestea sunt operații de asamblare propriu zisă, plasarea componentei *pallet* pe transportor, operațiile de scriere a datelor de producție pe tag-ul RFID și operația de transport către următoarea stație;

$T_{dataS1} = \{T_j\}_{j=1,4}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor asociate transferului de informații relativ la producție. Astfel informațiile asociate unui singur produs sunt transferate în cadrul stației, pentru a fi scrise pe tag-ul RFID;

$T_{resS1} = \{T_8\}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor asociate operațiilor de realimentare a depozitelor cu componente.

Funcția de ponderare a arcelor de intrare reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$I_{S1} : (P_{S1} \times T_{S1}) \rightarrow Q_+. \quad (2.12)$$

Funcția de ponderare a arcelor de ieșire reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite tranziții cu anumite poziții

$$O_{S1} : (T_{S1} \times P_{S1}) \rightarrow Q_+. \quad (2.13)$$

Temporizările asociate tranzițiilor modelului RPT sunt definite prin funcția $temp_{S1}$

$$temp_{S1} : T_{S1} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (2.14)$$

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje asociat stărilor inițiale, este reprezentat de

$$m_{0S1} : P_{S1} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (2.15)$$

Evenimentele externe, reprezentate de E_{dS1} , sunt semnalele externe de sincronizare utilizate în controlul procesului de fabricație

$$E_{dS1} = \{E_{dS1}^1, E_{dS1}^2, E_{dS1}^3\} \cup \{e_{S1}\}. \quad (2.16)$$

Funcția $Sync_{S1}$ condiționează execuția unor tranziții, de recepția evenimentelor externe cu care sunt sincronizate:

$$Sync_{S1} : \{T_1, T_2, T_7\} \rightarrow \{E_{dS1}^1, E_{dS1}^2, E_{dS1}^3\} \cup \{e_{S1}\}, \quad (2.17)$$

unde “ e_{S1} ” reprezintă evenimentul neutru încorporat în monoidul E_{dS1}^* . Astfel pentru $Sync_{S1}$ se definesc componentele:

$$\begin{aligned} Sync1_{S1} : T_1 &\rightarrow \{E_{dS1}^1\} \\ Sync2_{S1} : T_2 &\rightarrow \{E_{dS1}^2\}, \\ Sync3_{S1} : T_7 &\rightarrow \{E_{dS1}^3\} \end{aligned} \quad (2.18)$$

unde:

$E_{dS1}^1 = Sync1_{S1}$ → reprezintă semnalul de sincronizare a operațiilor de asamblare, cu recepția informațiilor de planificare a secvenței de producție pentru produsele Tip 1;

$E_{dS1}^2 = Sync2_{S1}$ → reprezintă semnalul de sincronizare a operațiilor de asamblare, cu semnalul de recepție a informațiilor de planificare a producției pentru produsele Tip 2;

$E_{dS1}^3 = Sync3_{S1}$ → reprezintă semnalul de sincronizare a transportului produsului de la Stația 1, la Stația 2, cu semnalul de validare a stării de disponibilitate a stației.

În Figura 25, se prezintă rezultatele simulării modelului Stației 1, respectiv operațiile de asamblare, transport, și de transfer a informațiilor pentru produsele Tip 2 (Figura 25.a) și Tip 1 (Figura 25.b). Graficele ilustrează duratele secvențelor succesive ale producției și transferul informațional. Deși există diferențe între configurațiile Tip 2 și Tip 1, o serie de operații sunt comune. În Stația 1, procesul de asamblare este identic pentru ambele tipuri de produse. Componenta *pallet* este echipată cu tag RFID, pe care sunt scrise în fiecare stație, informațiile de producție ale fabricației curente.

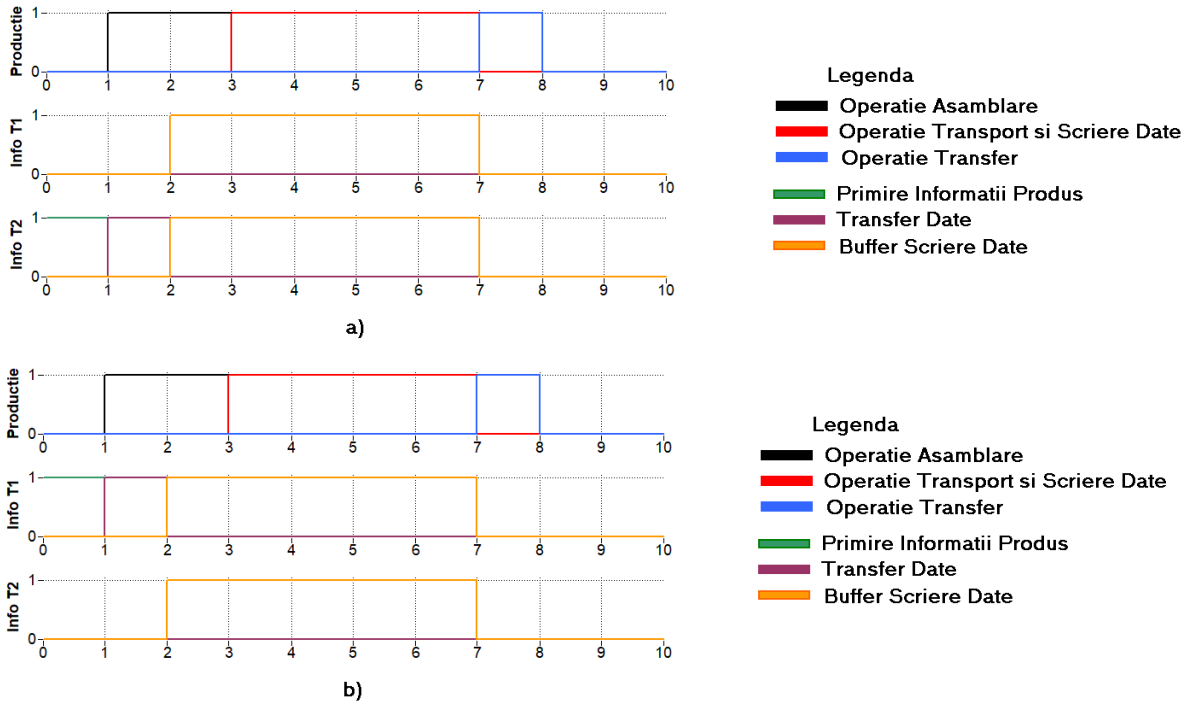


Figura 25. a) Rezultatele simulării modelului RPS_{S1} aferente procesului de asamblare și sincronizării cu citirea/scrierea datelor pentru produsele Tip 2; b) Rezultatele simulării modelului RPS_{S1} aferente procesului de asamblare și sincronizării cu citirea/scrierea datelor pentru produsele Tip 1.

2.2.2. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 2

În Stația 2 are loc plasarea componentei base pe *pallet* echipat cu un tag RFID. Această operație este comună tuturor operațiilor de fabricație. În Figura 26 este prezentată succesiunea sarcinilor realizate în Stația 2, în cursul procesului de asamblare.

Similar cu Stația 1, modelul Stației 2 poate fi exprimat ca:

$$RPS2 = \langle RPT_{S2}, E_{dS2}, Sync_{S2} \rangle, \quad (2.19)$$

cu modelul temporizat RPT reprezentată de

$$RPT_{S2} = \langle P_{S2}, T_{S2}, I_{S2}, O_{S2}, m_{0S2}, temp_{S2} \rangle. \quad (2.20)$$

În modelul RPT mulțimea pozițiilor este reprezentată de $P_{S2} = \{P_{cts2}, P_{as2}, P_{dataS2}, P_{whS2}\}$ unde:

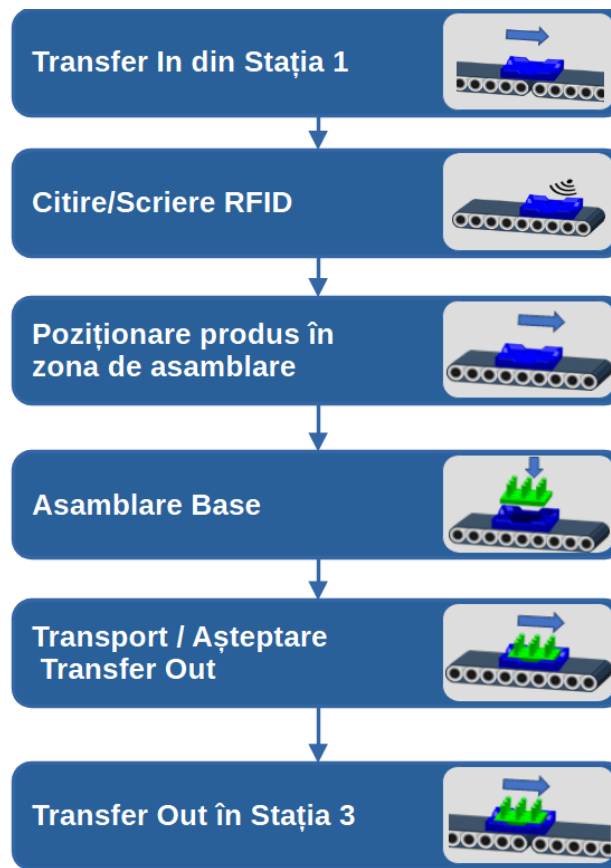


Figura 26. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației din Stația 2

$P_{ctS2} = \{P_i\}_{i=10,12}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate semnalelor care monitorizează disponibilitatea Stațiilor 1, 2 și 3;

$P_{as2} = \{P_j\}_{j=1,5}$ → reprezintă mulțimea stărilor succesive ale produsului, în curs de asamblare;

$P_{dataS2} = \{P_k\}_{k=6,9}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate informațiilor de producție în Stația 2. Aceste variabile, citite/scrise pe tag-ul RFID, reprezintă momentul de intrare/ieșire a piesei în/din stație;

$P_{whS2} = \{P_{13}\}$ → reprezintă poziția asociată depozitului de componente al Stației 2.

Mulțimea tranzițiilor modelului este reprezentat de $T_{S2} = \{T_{as2}, T_{dataS2}, T_{resS2}\}$ unde:

$T_{as2} = \{T_i\}_{i=1,5}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor de fabricație din Stația 2;

$T_{dataS2} = \{T_j\}_{j=6,8}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor de transfer a informațiilor, citite/scrise a tag-ului RFID;

$T_{resS2} = \{T_9\}$ → reprezintă tranziția asociată cu operația de realimentare a depozitului Stației 2.

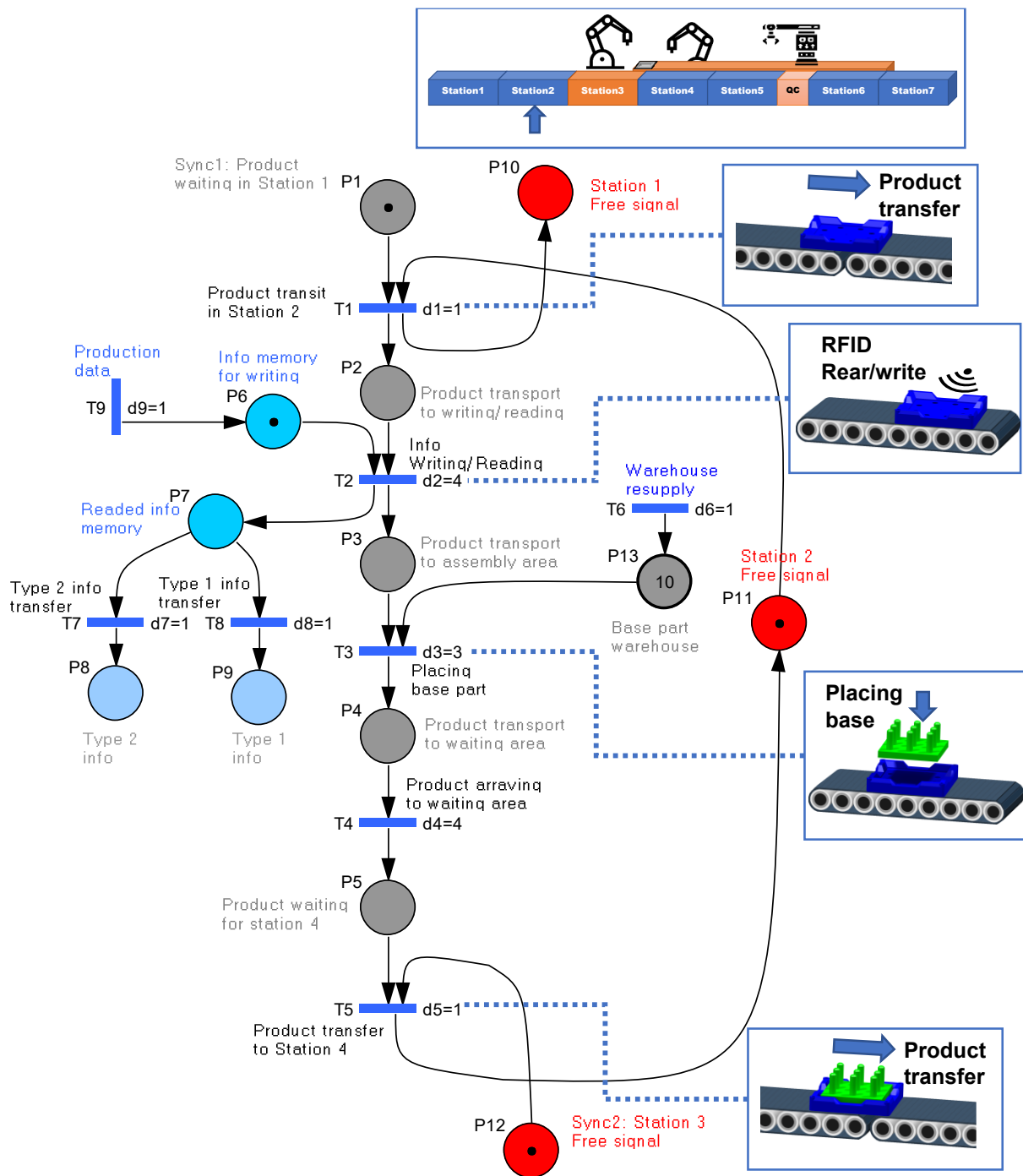


Figura 27. Modelul RPS asociat procesului de fabricație din Stația 2

Funcția de ponderare a arcelor de intrare reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$I_{S2} : (P_{S2} \times T_{S2}) \rightarrow Q_+ . \quad (2.21)$$

Funcția de ponderare a arcelor de ieșire reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite tranziții cu anumite poziții

$$O_{S2} : (T_{S2} \times P_{S2}) \rightarrow Q_+ . \quad (2.22)$$

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje asociat stărilor inițiale, este reprezentat de

$$m_{0S2} : P_{S2} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (2.23)$$

Temporizările asociate tranzițiilor modelului RPT sunt definite prin funcția $temp_{S2}$

$$temp_{S2} : T_{S2} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (2.24)$$

Evenimentele externe, reprezentate de E_{dS2} , sunt semnalele externe pentru sincronizări ale diferitelor secvențe de fabricație

$$E_{dS2} = \{E_{dS2}^1, E_{dS2}^2\} \cup \{e_{S2}\}. \quad (2.25)$$

Funcția $Sync_{S2}$ asociază anumite tranziții cu evenimente externe:

$$Sync_{S2} : \{T_1, T_2\} \rightarrow \{E_{dS2}^1, E_{dS2}^2\} \cup \{e_{S2}\}, \quad (2.26)$$

unde “ e_{S2} ” reprezintă evenimentul neutru în monoidul E_{dS2}^* . Astfel se pot scrie:

$$\begin{aligned} Sync1_{S2} : T_1 &\rightarrow \{E_{dS2}^1\} \\ Sync2_{S2} : T_5 &\rightarrow \{E_{dS2}^2\} \end{aligned}, \quad (2.27)$$

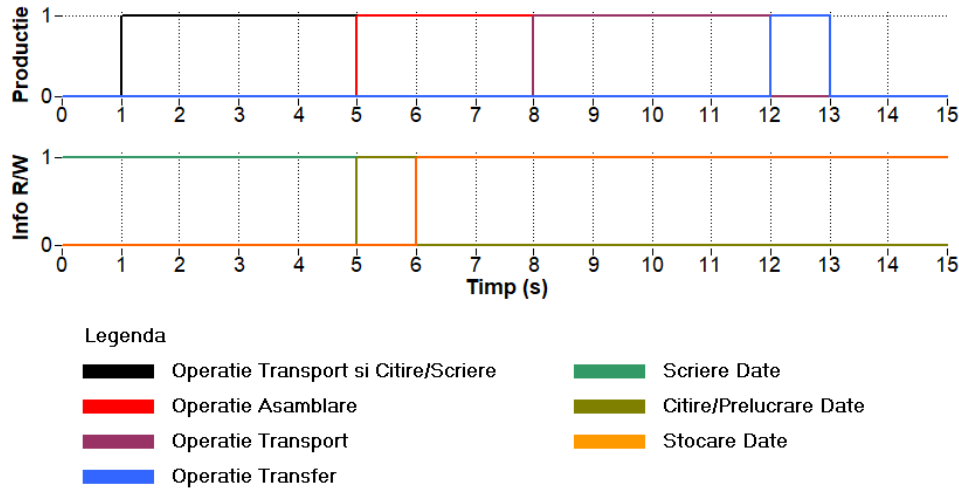


Figura 28. Rezultatele simulării modelului RPS_{S2} corespunzător operațiilor de asamblare, transport, transfer informațional și de sincronizare cu operațiile de citire/scriere a datelor, pentru produsul Tip 1

$E_{dS2}^1 = Sync1_{S2}$ → reprezintă semnalul de sincronizare a finalului asamblării din Stația 1, cu inițierea transferului la Stația 2. Evenimentul este condiționat de disponibilitatea Stației 2;

$E_{dS2}^2 = Sync2_{S2}$ → reprezintă semnalul de sincronizare a finalului asamblării din Stația 2, cu inițierea transferului la Stația 3. Evenimentul este condiționat de disponibilitatea Stației 3.

În Figura 28 sunt prezentate rezultatele simulării modelului RPS, asociat fabricației din Stația 2. Această stație este responsabilă pentru asamblarea pe *pallet*, a componentei *base*, operație comună fabricației produselor Tip 1 și Tip 2. În Stația 2 se desfășoară operațiile: transportul piesei din stația anterioară, citirea/scrierea datelor de producție, asamblarea componentei *base*, transportul către ieșirea din stație, și transferul către stația următoare. Duratele acestor operații, rezultă prin simularea modelului RPT, și sunt prezentate în Figura

28. În această stație, pe tag-ul RFID este scris momentul intrării produsului, urmat de citirea de producție, și prelucrarea acestora. Aceste informații sunt apoi procesate și stocate, până la următorul ciclu de producție.

2.2.3. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 3

Producția din Stația 3 implică execuția a două procese paralele: fabricație flexibilă în flux și fabricație flexibilă în celulă (Figura 29). Produsul aflat în asamblare prin fabricație în flux, va tranzita Stația 3, fără a suferi modificări tehnologice, și fără a staționa. Stația 3 este dedicată exclusiv fabricației flexibile în celulă, unde operațiile sunt efectuate de manipulatorul ABB. Pentru fabricația flexibilă în celulă, s-a considerat asamblarea produsului multistrat. Tip 1 și a produsului Tip 2, care respectă planificarea producției.

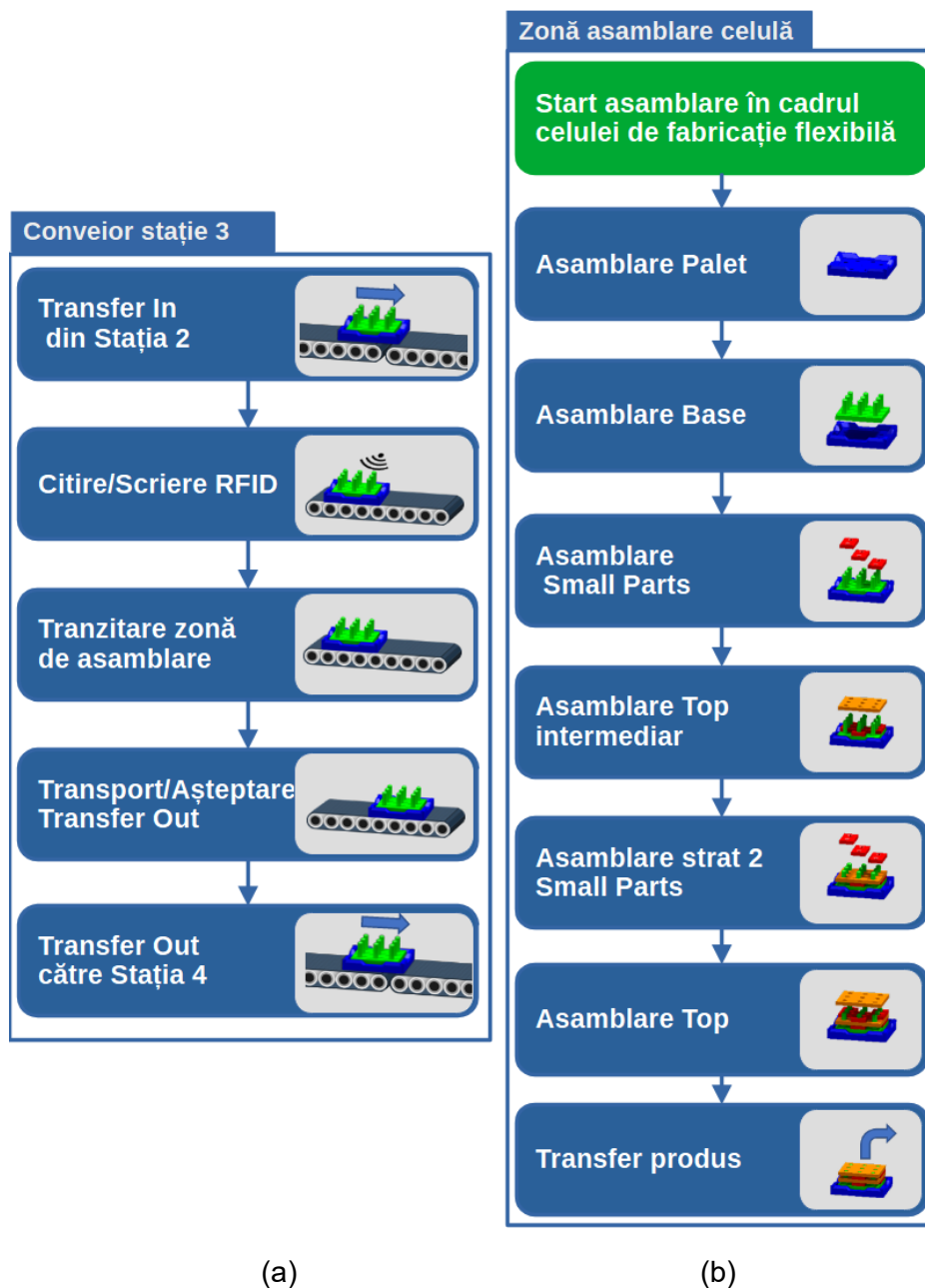


Figura 29. a) Schema bloc a operațiilor aferente fabricației în flux din Stația 3; b) Schema bloc a operațiilor aferente fabricației flexibile în celulă din Stația 3

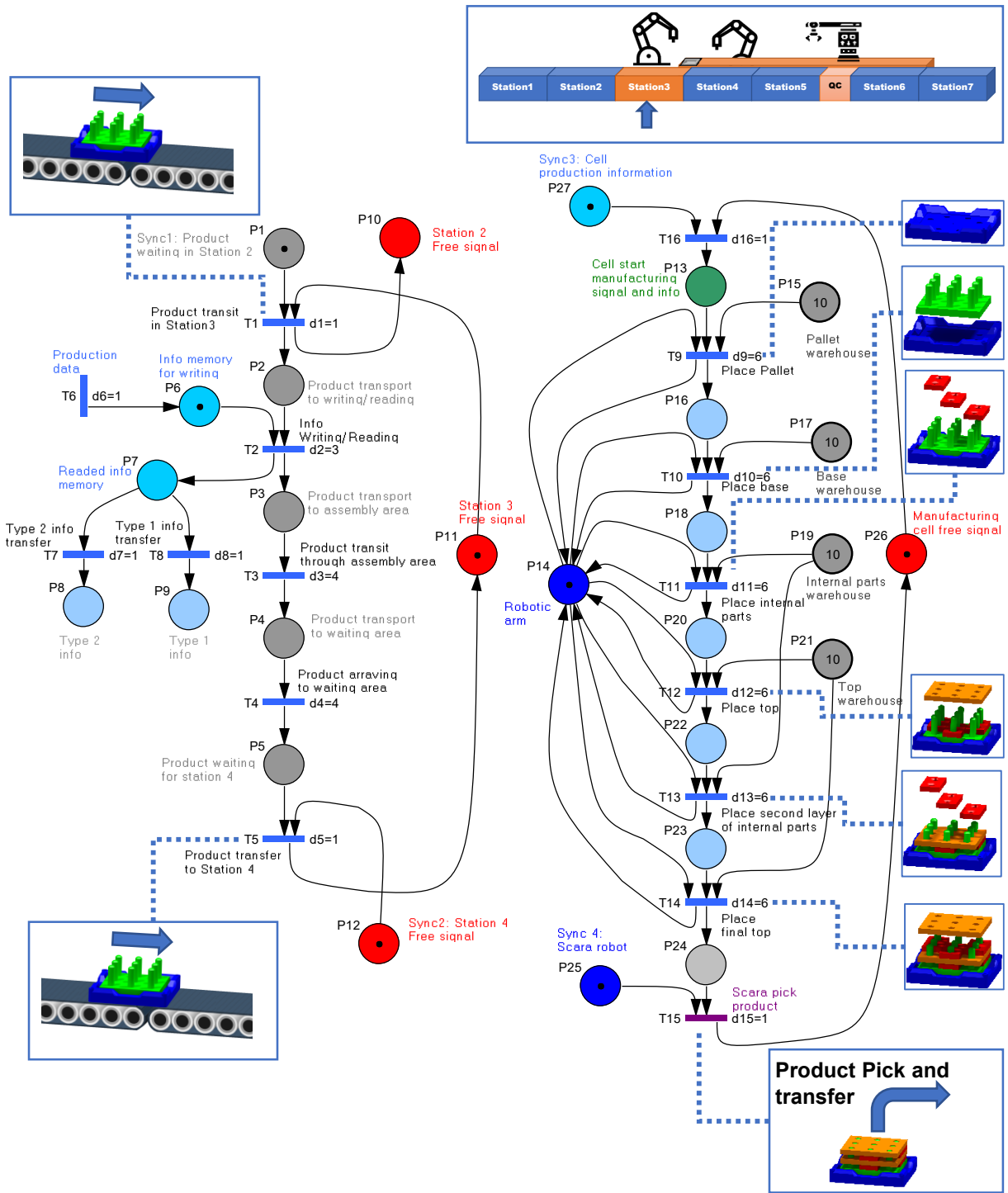


Figura 30. Modelul RPS asociat fabricației flexibile din Stația 3 - Celula Flexibilă

Modelarea celor două procese paralele din Stația 3 sunt integrate într-un model cu RPS:

$$RPS_{S3} = \langle RPT_{S3}, E_{dS3}, Sync_{S3} \rangle, \quad (2.28)$$

unde componenta RPT este un sextuplu:

$$RPT_{S3} = \langle P_{S3}, T_{S3}, I_{S3}, O_{S3}, m_{0S3}, temp_{S3} \rangle. \quad (2.29)$$

În modelul RPT_{S3} , mulțimea pozițiilor este reprezentată de $P_{S3} = \{P_{ct1S3}, P_{ctcS3}, P_{als3}, P_{acs3}, P_{daatals3}, P_{dataacs3}\}$ compusă din:

$P_{ctLS3} = \{P_i\}_{i=10,12}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate semnalelor de monitorizare a disponibilității stațiilor. În modelul RPS, se vor evidenția prin simulare stările de disponibilitate exclusivă a stațiilor 2, 3 și 4;

$P_{ctcS3} = \{P_v\}_{v=25,26}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate disponibilității exclusive a zonei de fabricație în celulă și a locației de acces dedicată sistemului de transport SCARA;

$P_{alS3} = \{P_j\}_{j=1,5}$ → reprezintă mulțimea stărilor produsului, în cursul asamblării, pe sistemul de fabricație flexibilă în flux;

$P_{acS3} = \{P_b\}_{b=13,24}$ → reprezintă mulțimea stărilor produsului, în cursul procesului de fabricație flexibilă în celulă;

$P_{dataLS3} = \{P_k\}_{k=6,9}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate informațiilor specifice secvențelor de fabricație, pe sistemul de fabricație flexibile în flux;

$P_{datacS3} = \{P_{27}\}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate informațiilor specifice secvențelor de fabricație, pe sistemul de fabricație flexibilă în celulă.

Mulțimea tranzițiilor modelului RPS este definită de mulțimea $T_{S3} = \{T_{alS3}, T_{acS3}, T_{dataLS3}, T_{datacS3}\}$ unde:

$T_{alS3} = \{T_i\}_{i=1,5}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor de transfer și asamblare pentru fabricația flexibilă în flux;

$T_{acS3} = \{T_v\}_{v=9,15}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor de asamblare și transfer pentru fabricația flexibilă în celulă;

$T_{dataLS3} = \{T_j\}_{j=6,8}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor de colectare a informațiilor pentru fabricația flexibilă în flux;

$T_{datacS3} = \{T_{16}\}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor de colectarea a informațiilor pentru fabricația flexibilă în celulă.

Funcția de ponderare a arcelor de intrare reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$I_{S3} : (P_{S3} \times T_{S3}) \rightarrow Q_+ . \quad (2.30)$$

Funcția de ponderare a arcelor de ieșire reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite tranziții cu anumite poziții

$$O_{S3} : (T_{S3} \times P_{S3}) \rightarrow Q_+ . \quad (2.31)$$

Temporizările asociate tranzițiilor modelului RPT sunt definite prin funcția $temp_{S3}$

$$temp_{S3} : T_{S3} \rightarrow Q_{S3+} \cup \{0\} . \quad (2.32)$$

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje asociat stărilor inițiale, este reprezentat prin:

$$m_{0S3} : P_{S3} \rightarrow Q_+ \cup \{0\} . \quad (2.33)$$

Mulțimea semnalelor externe Stației 3, reprezentate de E_{dS3} , este definită ca:

$$E_{dS3} = \{E_{dS3}^1, E_{dS3}^2, E_{dS3}^3, E_{dS3}^4\} \cup \{e_{S3}\} . \quad (2.34)$$

Considerând mulțimea semnalelor externe, funcția $Sync_{S3}$ este utilizată pentru a corela validarea unor tranziții, de către semnalele externe asociate, rezultând:

$$Sync_{S3} : \{T_1, T_5, T_{15}, T_{16}\} \rightarrow \{E_{dS3}^1, E_{dS3}^2, E_{dS3}^3, E_{dS3}^4\} \cup \{e_{S3}\} , \quad (2.35)$$

unde “ e_{S3} ” reprezintă un evenimentul neutru în cadrul monoidului E_{dS3}^* . Astfel rezultă relațiile:

$$\begin{aligned} Sync1_{S3} : T_1 &\rightarrow \{E_{dS3}^1\} \\ Sync2_{S3} : T_5 &\rightarrow \{E_{dS3}^2\} \\ Sync3_{S3} : T_{15} &\rightarrow \{E_{dS3}^3\} \\ Sync4_{S3} : T_{16} &\rightarrow \{E_{dS3}^4\} \end{aligned} , \quad (2.36)$$

$E_{dS1}^1 = Sync1_{S3} \rightarrow$ reprezintă semnalul de sincronizare a inițierii fabricației flexibile în flux, cu semnalul de validare a prezenței unui produs, la ieșirea din stația anterioare;

$E_{dS1}^2 = Sync2_{S1} \rightarrow$ reprezintă sincronizarea start-ului operației de transfer a produsului către stația următoare, cu semnalul de validare a disponibilității acesteia;

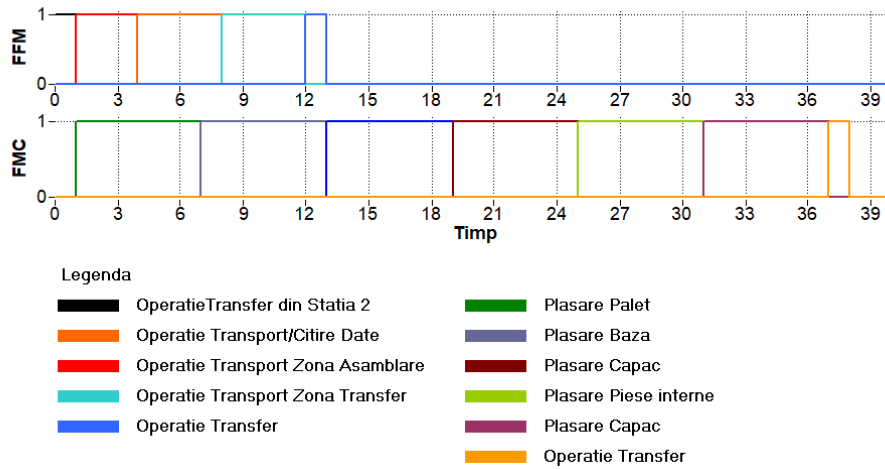


Figura 31. Rezultatele simulării modelului RPS_{S3} corespunzător proceselor paralele de fabricație flexibilă în flux (FFM) și în celulă (FMC), pentru un produs Tip1

$E_{dS3}^3 = Sync3_{S3} \rightarrow$ reprezintă sincronizarea start-ului procesului de fabricație flexibilă în celulă, cu transmiterea datelor de planificare a producției;

$E_{dS3}^4 = Sync4_{S3} \rightarrow$ reprezintă sincronizarea finalizării asamblării unui produs în celula flexibilă, cu semnalul de validare a disponibilității sistemului de transport SCARA, pentru efectuarea transferului produsului către punctul de control al calității.

În Figura 31 sunt prezentate rezultatele simulării modelului RPS al Stației 3, pentru execuția în paralel a celor două procese: fabricația flexibilă în flux și fabricație flexibilă în celulă, cu ilustrarea duratele operațiilor.

În cazul procesului de fabricație în flux din Stația 3, operațiile sunt doar de transport și citire/scriere a informației. Pentru procesul de fabricație în celulă, graficele evidențiază durata fiecărei operații de asamblare a unei piese a produsului Tip 1, începând cu plasarea *pallet*-ului, până la aplicarea celui de-al doilea capac. Operațiile de asamblare sunt realizate succesiv, iar după finalizarea asamblării produsul este preluat și transportat către punctul de control al calității.

2.2.4. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 4

În Stația 4, care este deservită de manipulatorul robotic FANUC, se poate efectua asamblarea produselor cu diferite configurații, conform gamei de fabricație. Acestea sunt structurate pe straturi intermediare (Figura 32). Produsul lansat în fabricație are o configurație prestabilită prin intermediul interfeței om-mașină HMI, care permite personalizarea celor două tipuri de produse, care vor fi lansate în producție. În cadrul acestei interfețe, utilizatorul poate selecta tipul de produs și configurația straturilor de componente. Aceste date sunt transferate pe tag-ul RFID în Stația 1, și citite în Stația 4. Pe baza configurației selectate produsul urmează a fi asamblat.

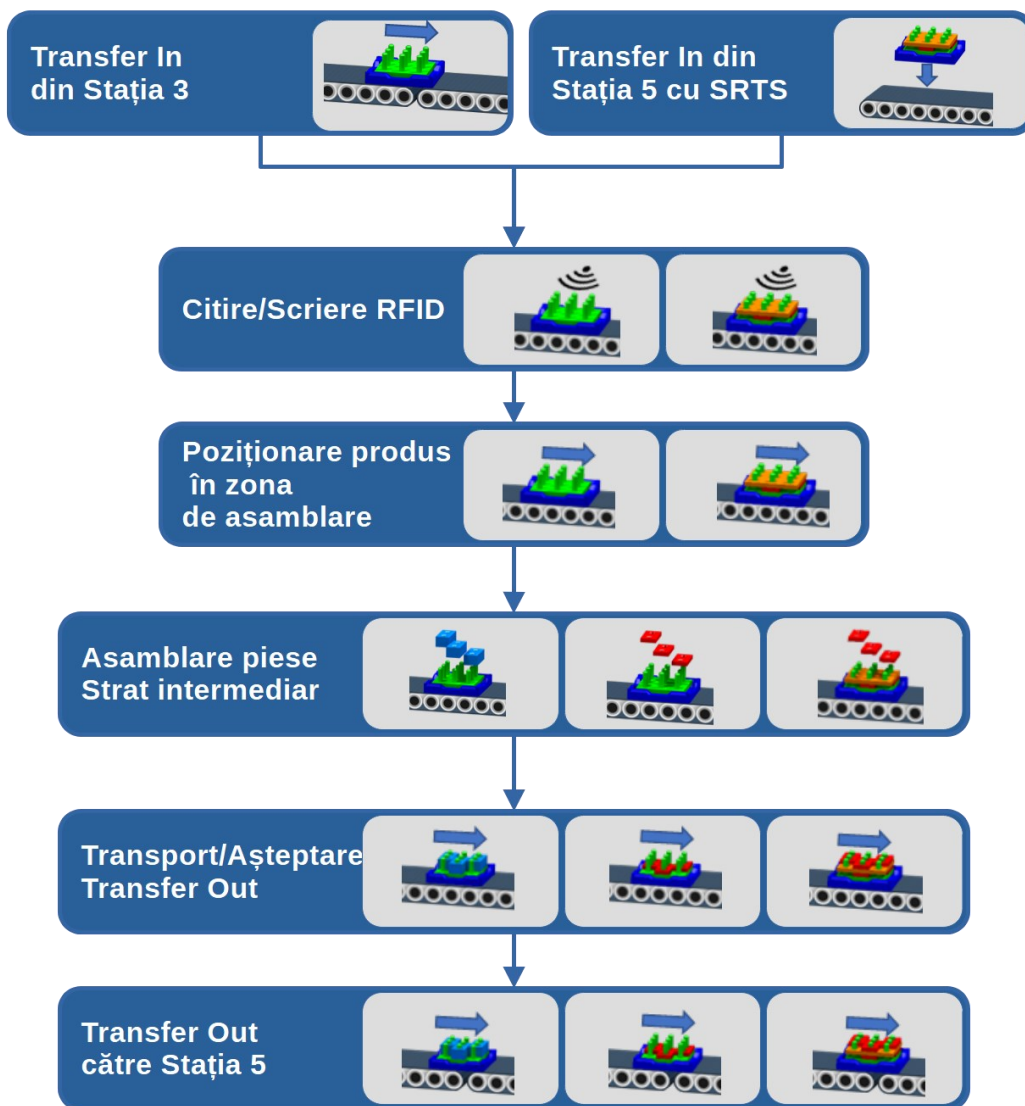


Figura 32. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației flexibile din Stația 4

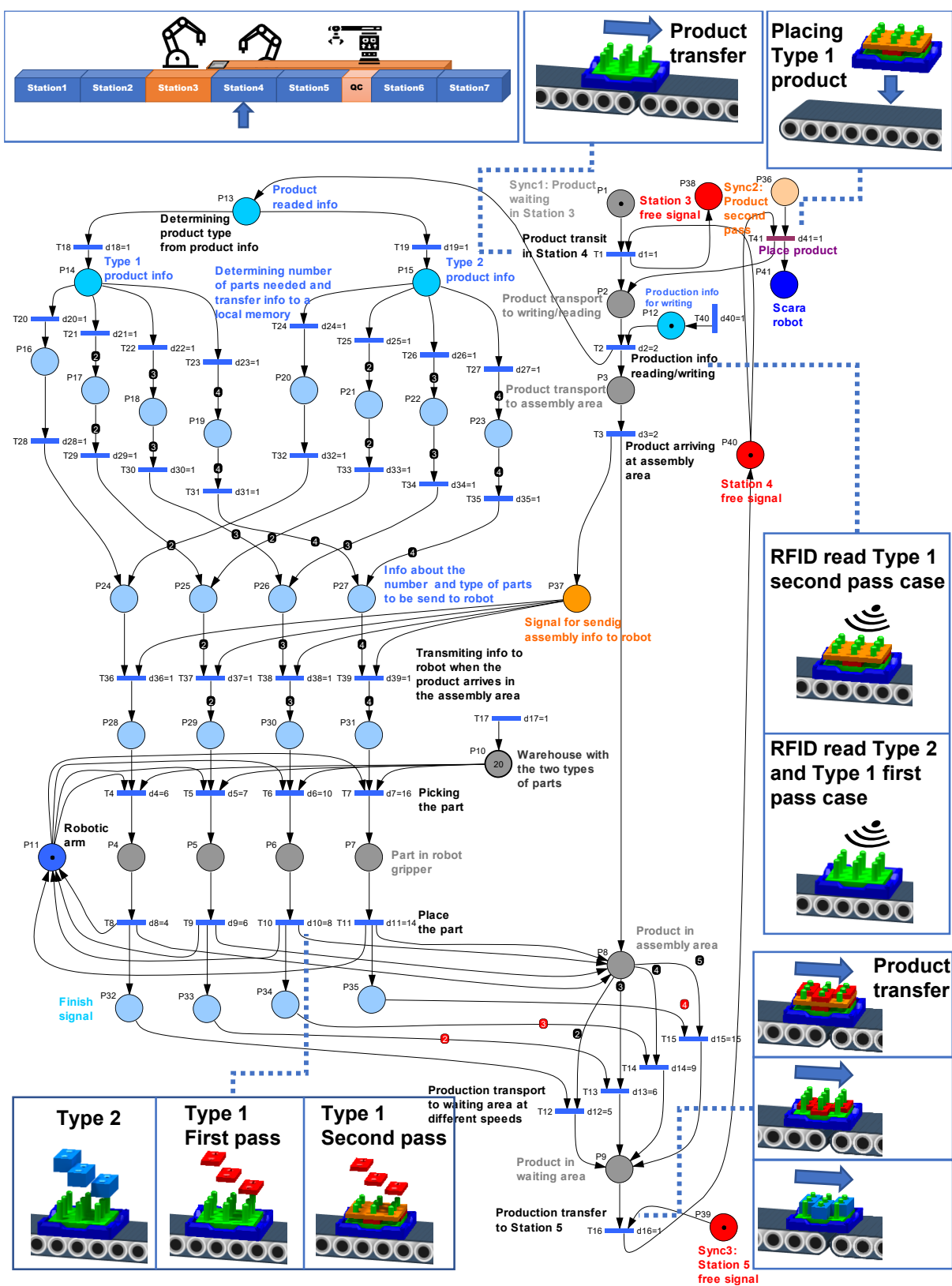


Figura 33. Modelul RPS asociat fabricației flexibile din Stația 4

Modelul asociat Stației 4 este definit ca model de tip RPS:

$$RPS_{S4} = \langle RPT_{S4}, E_{dS4}, Sync_{S4} \rangle, \quad (2.37)$$

unde componenta temporizată RPT este definită ca:

$$RPT_{S4} = \langle P_{S4}, T_{S4}, I_{S4}, O_{S4}, m_{0S4}, temp_{S4} \rangle. \quad (2.38)$$

În modelul RPT_{S4} mulțimea pozițiilor P_{S4} , reprezentată de $P_{S4} = \{P_{ctS4}, P_{aS4}, P_{dataS4}\}$, este compusă :

$P_{ctS4} = \{P_i\}_{i=37,40}$ → reprezintă mulțimea stărilor de disponibilitate exclusivă a stațiilor implicate în fluxul de lucru;

$P_{aS4} = \{P_j\}_{j=1,10} \cup \{P_{36}, P_{41}\}$ → reprezintă mulțimea stărilor produsului supus asamblării în Stația 4;

$P_{dataS4} = \{P_k\}_{k=12,35}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate informațiilor de producție, modificate prin operațiile de citire/scriere, specifice tipului de produs.

Mulțimea tranzițiilor modelului RPT este reprezentată de $T_{S4} = \{T_{aS4}, T_{dataS4}\}$ unde:

$T_{aS4} = \{T_i\}_{i=1,16} \cup \{P_{41}\}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor de asamblare și transport a pieselor. Acestea sunt preluate pe conveior din stația precedentă sau reintroduse în fluxul fabricației de sistemul robotic SCARA;

$T_{dataS4} = \{T_j\}_{j=18,40}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor discrete asociate operațiilor informatice de scriere/citire/procesare a datelor de producție.

Funcția de ponderare a arcelor de intrare reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$I_{S4} : (P_{S4} \times T_{S4}) \rightarrow Q_+. \quad (2.39)$$

Funcția de ponderare a arcelor de intrare reprezintă ponderile arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite tranziții cu anumite poziții

$$O_{S4} : (T_{S4} \times P_{S4}) \rightarrow Q_+. \quad (2.40)$$

Temporizările asociate tranzițiilor modelului RPT sunt definite prin funcția $temp_{S4}$

$$temp_{S4} : T_{S4} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (2.41)$$

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje, asociat stărilor inițiale, este m_{0S4}

$$m_{0S4} : P_{S4} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (2.42)$$

Mulțimea semnalelor externe Stației 4, reprezentate de E_{aS4} , este definită ca

$$E_{aS4} = \{E_{aS4}^1, E_{aS4}^2, E_{aS4}^3\} \cup \{e_{S4}\}. \quad (2.43)$$

Considerând mulțimea semnalelor externe, funcția $Sync_{S4}$ este utilizată pentru a corela o mulțime de tranziții, cu semnalele externe asociate:

$$Sync_{S4} : \{T_1, T_{16}, T_{41}\} \rightarrow \{E_{aS4}^1, E_{aS4}^2, E_{aS4}^3\} \cup \{e_{S4}\}, \quad (2.44)$$

cu “ e_{S4} ” un eveniment neutru al monoidului E_{aS4}^* . Funcția de sincronizare $Sync_{S4}$ detaliată pe componente este:

$$\begin{aligned} Sync1_{S4} : T_1 &\rightarrow \{E_{dS4}^1\} \\ Sync2_{S4} : T_{16} &\rightarrow \{E_{dS4}^2\}, \\ Sync3_{S4} : T_{41} &\rightarrow \{E_{dS4}^3\} \end{aligned} \quad (2.45)$$

$E_{dS4}^1 = Sync1_{S4}$ → reprezintă semnalul de sincronizare a inițierii operației de transfer de la stația anterioară, cu verificarea disponibilității stației curente;

$E_{dS4}^2 = Sync2_{S4}$ → reprezintă semnalul de sincronizare a inițierii transferului produsului în stația următoare, cu verificarea stării de disponibilitate a stației următoare (stație liberă);

$E_{dS4}^3 = Sync3_{S4}$ → reprezintă semnalul de sincronizare a poziționării robotului SCARA în locația dedicată pentru transferul produsului în stație, cu semnalul de stop linie transportoare, în vedere preluării acestuia.

În Figura 34 este ilustrată simularea modelului RPS aferent asamblării unui produs Tip 1. Din grafic se pot prelua informații relative la duratele corespunzătoare asamblării fiecărei componente. Cele patru procese de asamblare a componentelor din stratul intermediar, sunt vizibile în jurul momentelor de 15, 25, 35 și 45 de secunde, fiind evidențiată creșterea cu o unitate a numărului de componente ale produsului pentru fiecare proces de asamblare. După finalizarea asamblării componentelor, produsul este transportat în stația următoare.

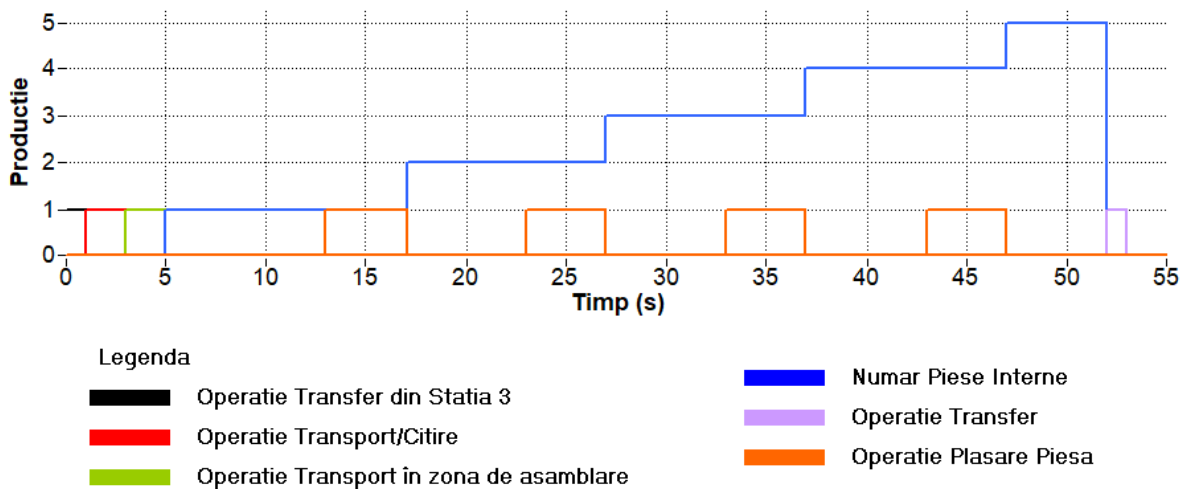


Figura 34. Rezultatele simulării modelului RPS_{S4} corespunzătoare asamblării unui produs Tip 1 cu patru componente pe stratul intermediar, și sincronizările cu operațiile de citire/scriere date

2.2.5. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 5

În Stația 5 sunt posibile trei scenarii de lucru (Figura 35):

- ✓ În primul scenariu, piesa Tip 2 este supusa operațiilor de asamblare, presare *top*, urmate de transferul produsului finit la testul de calitate.
- ✓ În al doilea scenariu piesa Tip 1, aflată la prima trecere este supusă operației de asamblare capac, urmată de transferul acesteia înapoi, la Stația 4. Operațiile de manipulare (*pick-up* și *dropping*) și transport sunt realizate de sistemul robotic de transport SCARA. Operația de transfer a produsului în stație, este sincronizată cu semnalul de stop al transportului, pe linia de fabricație;

- ✓ În scenariul trei, piesa Tip 1, pentru care s-a finalizat operația de asamblare a celui de-al doilea strat intermediar, este supusă operațiilor finale de asamblare, presare *top*, urmate de transferul produsului finit la testul de calitate.

Modelul RP asociat Stației 5 are tipologie RPS și este definit astfel:

$$RPS_{S5} = \langle RPT_{S5}, E_{dS5}, Sync_{S5} \rangle, \quad (2.46)$$

unde modelul RPT a rețelei este reprezentată de:

$$RPT_{S5} = \langle P_{S5}, T_{S5}, I_{S5}, O_{S5}, m_{0S5}, temp_{S5} \rangle. \quad (2.47)$$

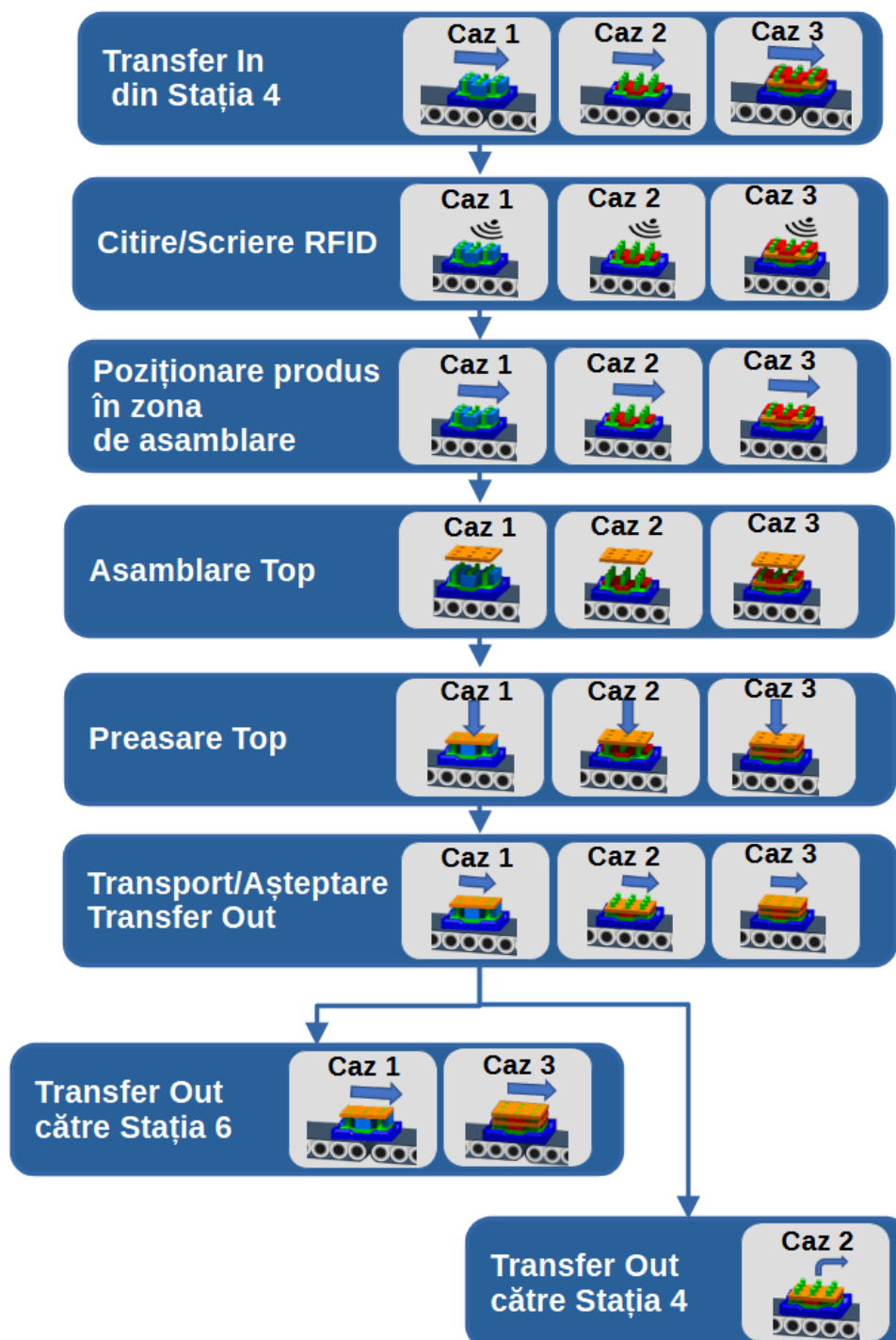


Figura 35. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației flexibile din Stația 5

În modelul RPT_{S5} , mulțimea stărilor este reprezentată de $P_{S5} = \{P_{cts5}, P_{as5}, P_{datas5}\}$ este compusă din:

$P_{cts5} = \{P_i\}_{i=13,15} \rightarrow$ reprezintă mulțimea stărilor asociate semnalelor de monitorizare a disponibilității stației curente și a celor învecinate;

$P_{as5} = \{P_j\}_{j=1,12} \rightarrow$ reprezintă mulțimea stărilor produsului, supus operațiilor succesive de asamblare în flux;

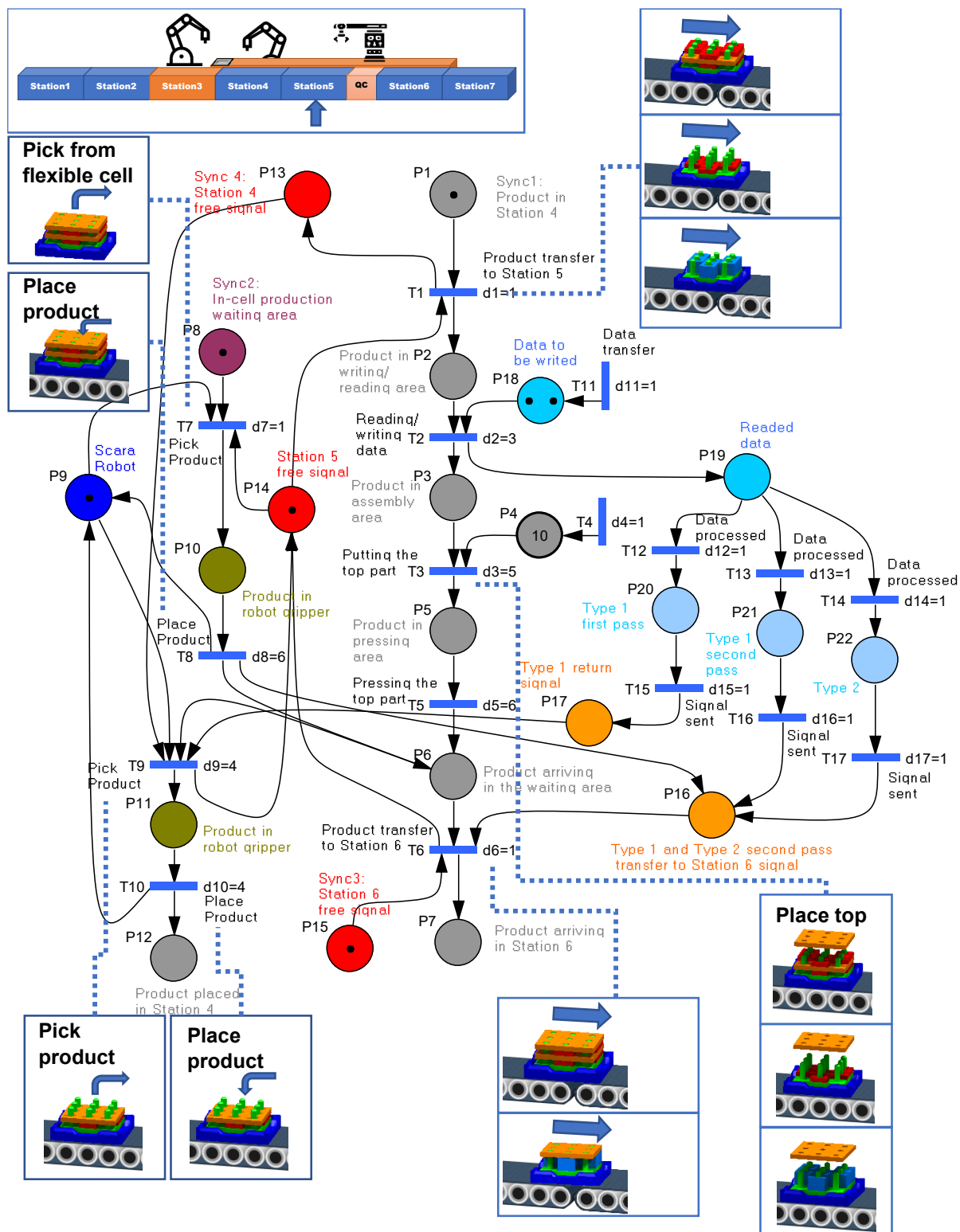


Figura 36. Modelul RPS asociat fabricației flexibile din Stația 5

$P_{dataS5} = \{P_k\}_{k=16,22}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate algoritmului informatic din stație.

Mulțimea tranzițiilor rețelei este reprezentată de $T_{S5} = \{T_{as5}, T_{dataS5}\}$ unde:

$T_{as5} = \{T_i\}_{i=1,10}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor asociate operațiilor de transfer și asamblare în procesul de fabricație;

$T_{dataS5} = \{T_j\}_{j=11,17}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor asociate operațiilor informaționale din stație.

Funcția de ponderare a arcelor de intrare asociază ponderi arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$I_{S5} : (P_{S5} \times T_{S5}) \rightarrow Q_+. \quad (2.48)$$

Funcția de ponderare a arcelor de intrare asociază ponderi arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite tranziții cu anumite poziții

$$O_{S5} : (T_{S5} \times P_{S5}) \rightarrow Q_+. \quad (2.49)$$

Temporizările asociate tranzițiilor modelului RPT sunt definite prin funcția $temp_{S5}$

$$temp_{S5} : T_{S5} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (2.50)$$

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje asociat stărilor inițiale, este reprezentat de

$$m_{0S5} : P_{S5} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (2.51)$$

Mulțimea evenimentelor externe, reprezentată de E_{dS5} , este mulțimea semnalelor externe utilizate în procesul de fabricație:

$$E_{dS5} = \{E_{dS5}^1, E_{dS5}^2, E_{dS5}^3, E_{dS5}^4\} \cup \{e_{S5}\}, \quad (2.52)$$

unde “ e_{S5} ” reprezintă un evenimentul neutru încorporat în monoidul E_{dS5}^* .

Funcția $Sync_{S5}$ definește asocierile dintre un set de tranziții și un set de evenimente externe, reprezentate prin:

$$Sync_{S5} : \{T_1, T_6, T_7, T_9\} \rightarrow \{E_{dS5}^1, E_{dS5}^2, E_{dS5}^3, E_{dS5}^4\} \cup \{e_{S5}\}, \quad (2.53)$$

ale cărei componente sunt:

$$\begin{aligned} Sync1_{S5} : T_1 &\rightarrow \{E_{dS5}^1\} \\ Sync2_{S5} : T_6 &\rightarrow \{E_{dS5}^2\} \\ Sync3_{S5} : T_7 &\rightarrow \{E_{dS5}^3\} \\ Sync4_{S5} : T_9 &\rightarrow \{E_{dS5}^4\} \end{aligned}, \quad (2.54)$$

$E_{dS5}^1 = Sync1_{S5}$ → reprezintă semnalul de sincronizare al inițierii transferului produsului din stația anterioară, cu semnalul de validare a disponibilității stației curente;

$E_{dS5}^2 = Sync2_{S5}$ → reprezintă semnalul de sincronizare al inițierii transferului produsului din stația curentă, cu semnalul de validare a disponibilității stației următoare;

$E_{dS5}^3 = Sync3_{S5}$ → reprezintă semnalul de sincronizare al inițierii transportului produsului asamblat în Stația 3, cu semnalul care verifică disponibilitatea zonei de așteptare din Stația 5;

$E_{dS5}^4 = Sync4_{S5}$ → reprezintă semnalul de sincronizare al inițierii transferului piesei de Tip 1, cu semnalul care verifică disponibilitatea Stației 4 pentru reluarea ciclică a operațiilor de asamblare a unui strat nou .

În Figura 37 sunt reprezentate grafic rezultatele simulării modelului RPS asociat Stației 5. S-a considerat asamblarea unui produs multistrat Tip 1, urmat de transportul către Stația 6 dedicată efectuării testului de calitate. Pentru realizarea unui produs de Tip 1, în Stația 5 se vor derula următoarele operații: ●Citirea și scrierea datelor de producție; ●Montarea componentei *top* în zona de asamblare; ●Presare componentei *top*; ●Transferul produsului către stația următoare sau ●Preluarea, manipulare, transport cu manipulatorul SCARA pentru re-inserarea în Stația 4.

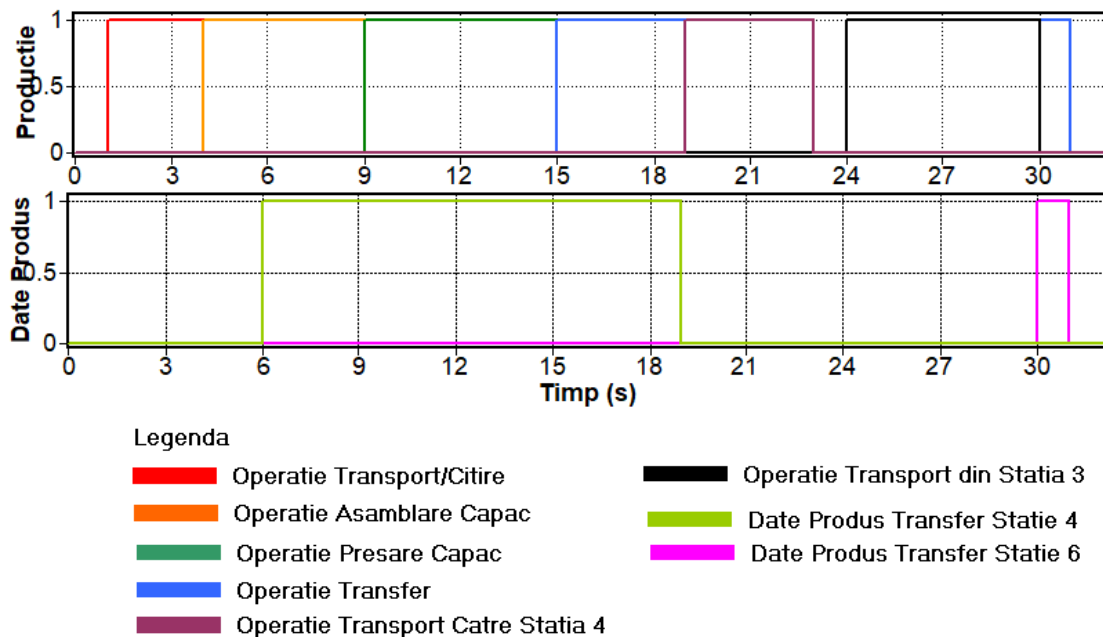


Figura 37. Rezultatele simulării modelului RPS_{S5} corespunzător asamblării unui produs Tip 1 și sincronizărilor cu operații de citire/scriere date

După plasarea produsului în Stația 4, sistemul de transport SCARA se deplasează în Stația 3, de unde preia un produs finalizat. Acest produs va fi transportat și plasat în locația dedicată asamblării din Stația 5. Produsul tranzitează Stația 5, el fiind transportat pe linie în Stația 6, pentru efectuarea testului de calitate.

În cel de-al doilea grafic s-au reprezentat informațiile de producție, referitoare la produsul aflat în stație. Aceste informații sunt utilizate pentru determinarea secvențelor de operații succesive în stație, din care rezultă dacă produsul va fi transferat către stația următoare, sau întors în Stația 4 pentru un nou set de operații. Astfel pentru produsul aflat pe linie, informațiile de stocare indică pentru primul produs transportul înapoi, către Stația 4, iar pentru cel de-al doilea, transferul către Stația 6.

2.2.6. Modelarea cu RPS a fabricației flexibile din Stația 6

Stația 6 este specializată în efectuarea testului de calitate a produselor, urmat de și depozitarea produselor conforme în magazia dedicată (Figura 38). În cazul în care un produs nu corespunde standardelor de calitate impuse, acesta va fi supus dezamblării.

Modelul asociat Stației 6, are tipologie RPS și este definit astfel:

$$RPS_{S6} = \langle RPT_{S6}, E_{dS6}, Sync_{S6} \rangle. \quad (2.55)$$

Componenta de tip RPT a modelului este definită prin:

$$RPT_{S6} = \langle P_{S6}, T_{S6}, I_{S6}, O_{S6}, m_{0S6}, temp_{S6} \rangle. \quad (2.56)$$

În modelul RPT, mulțimea stărilor modelului reprezentată de $P_{S6} = \{P_{ctS6}, P_{aS6}, P_{dataS6}\}$, unde:

$P_{ctS6} = \{P_i\}_{i=1,14}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate semnalelor transmise în sistem, cu privire la disponibilitatea stațiilor de lucru;

$P_{aS6} = \{P_j\}_{j=1,10}$ → reprezintă mulțimea stărilor succesive ale produsului supus asamblării și transportului pe fluxul de fabricație;

$P_{dataS6} = \{P_k\}_{k=15,18}$ → reprezintă mulțimea stărilor asociate variabilelor generate de algoritmul informatic asociat conducerii fabricației din stație;

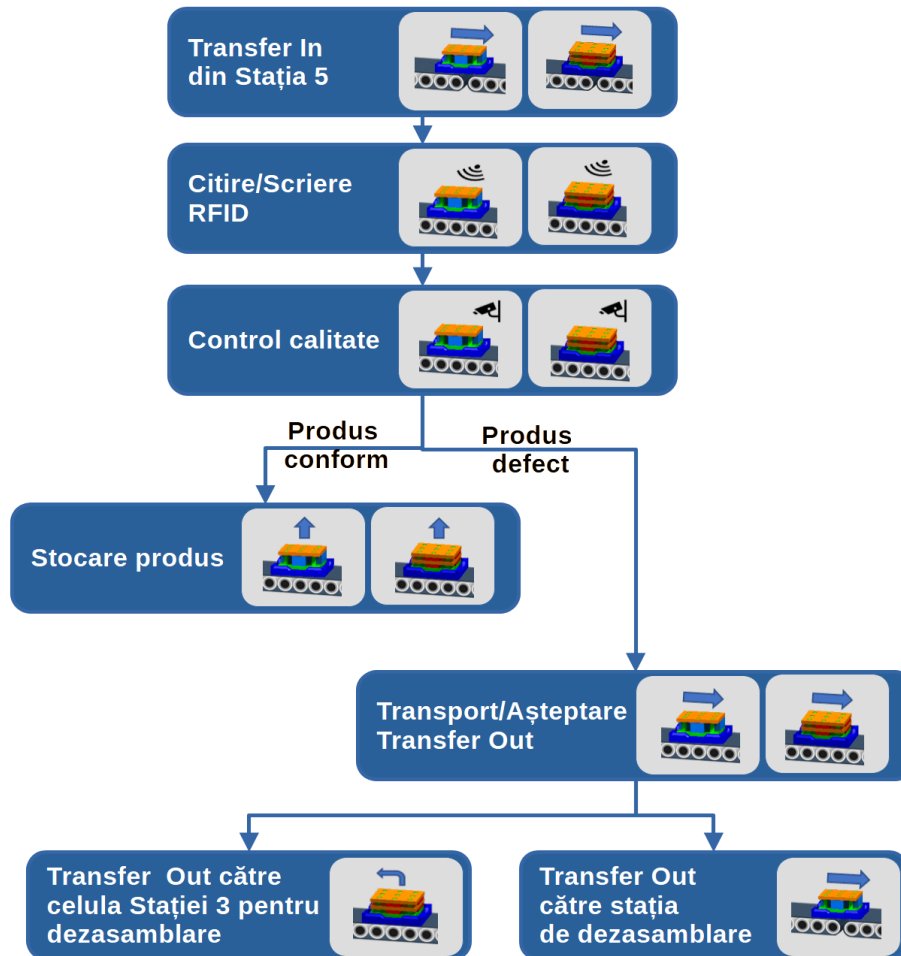


Figura 38. Schema bloc a operațiilor aferente fabricației din Stația 6

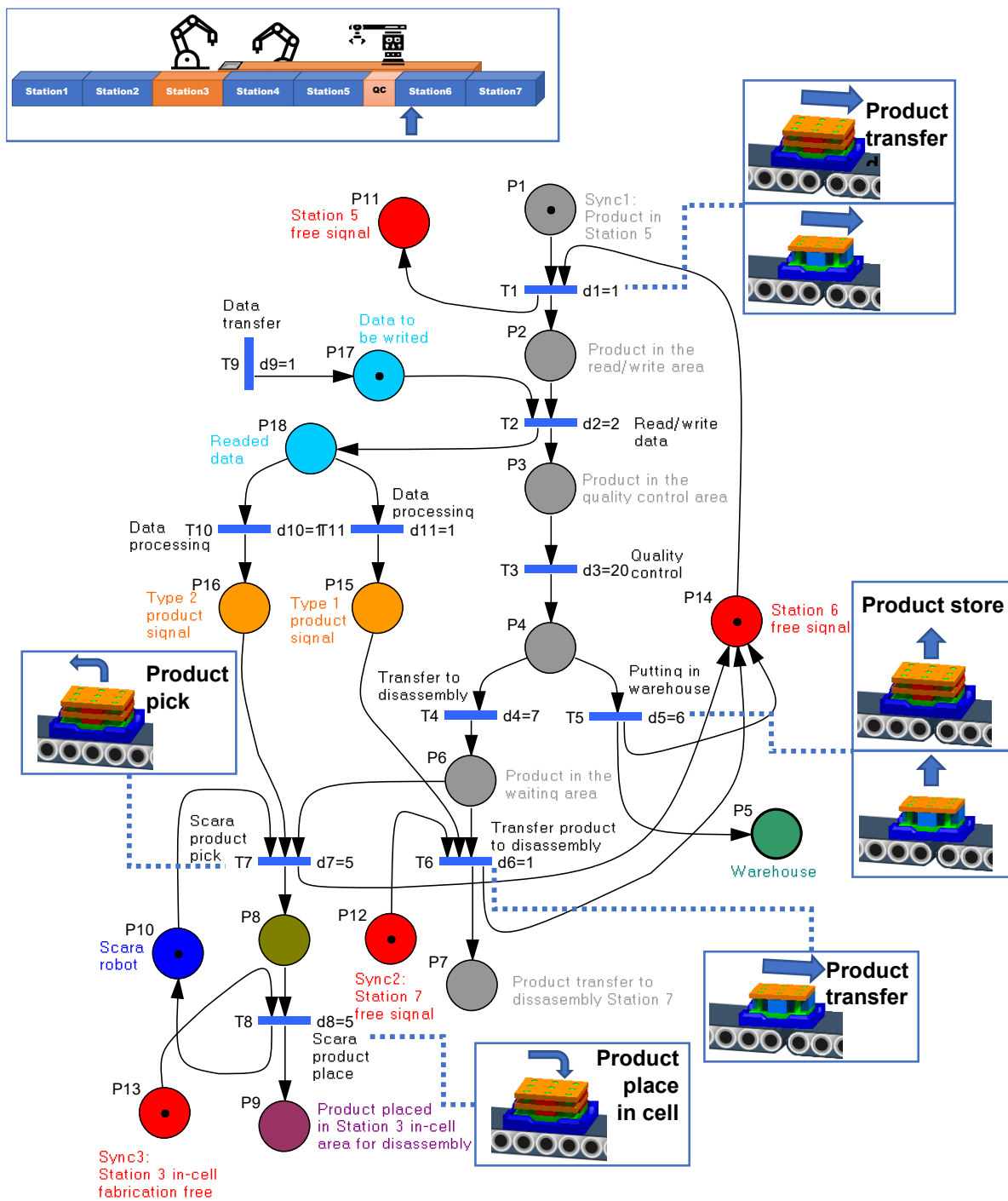


Figura 39. Modelul RPS asociat procesului de fabricație din Stația 6

Mulțimea tranzițiilor rețelei este reprezentată de $T_{S6} = \{T_{as6}, T_{dataS6}\}$ unde:

$T_{as6} = \{T_i\}_{i=1,8}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor asociate operațiilor de manipulare și verificare a calității, urmate de transport în Stația 6;

$T_{dataS6} = \{T_j\}_{j=9,11}$ → reprezintă mulțimea tranzițiilor asociate operațiilor definite prin algoritmul informatic, pentru conducerea fabricației din Stației 6;

Funcția de ponderare a arcelor de intrare asociază ponderi arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$I_{S6} : (P_{S6} \times T_{S6}) \rightarrow Q_+ \quad (2.57)$$

Funcția de ponderare a arcelor de intrare asociază ponderi arcelor care, în cadrul modelului, conectează anumite tranziții cu anumite poziții

$$O_{S6} : (T_{S6} \times P_{S6}) \rightarrow Q_+ . \quad (2.58)$$

Temporizările asociate tranzițiilor modelului RPT sunt definite prin funcția $temp_{S6}$

$$temp_{S6} : T_{S6} \rightarrow Q_+ \cup \{0\} . \quad (2.59)$$

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje asociat stărilor inițiale

$$m_{0S6} : P_{S6} \rightarrow Q_+ \cup \{0\} . \quad (2.60)$$

Mulțimea evenimentelor externe, reprezentată de E_{dS6} , reprezintă mulțimea semnalelor externe utilizate în procesul de verificare a calității în Stația 6:

$$E_{dS6} = \{E_{dS6}^1, E_{dS6}^2, E_{dS6}^3\} \cup \{e_{S6}\} , \quad (2.61)$$

unde “ e_{S6} ” reprezintă un eveniment neutru încorporat în monoidul E_{dS6}^* .

Funcția $Sync_{S6}$ reprezintă asocierile dintre mulțimea de tranziții și mulțimea de evenimente externe, definit de

$$Sync_{S6} : \{T_1, T_6, T_8\} \rightarrow \{E_{dS6}^1, E_{dS6}^2, E_{dS6}^3\} \cup \{e_{S6}\} , \quad (2.62)$$

ale cărei componente sunt:

$$\begin{aligned} Sync1_{S6} : T_1 &\rightarrow \{E_{dS6}^1\} \\ Sync2_{S6} : T_6 &\rightarrow \{E_{dS6}^2\} , \\ Sync3_{S6} : T_8 &\rightarrow \{E_{dS6}^3\} \end{aligned} \quad (2.63)$$

$E_{dS6}^1 = Sync1_{S6}$ → reprezintă semnalul de sincronizare al inițierii transferului produsului din stația anterioară, cu semnalul de validare a disponibilității locației în stația curentă;

$E_{dS6}^2 = Sync2_{S6}$ → reprezintă semnalul de sincronizare al inițierii transferului produsului din stația curentă, cu semnalul de validare a disponibilității stației următoare;

$E_{dS6}^3 = Sync3_{S6}$ → reprezintă semnalul de sincronizare al inițierii transferului produsului defect în Stația 3, cu semnalul de validare a disponibilității Stației 3 în vederea efectuării dezasamblării.

În cadrul Figura 40 se prezintă rezultatele simulării modelului RPS, din care rezultă duratele operațiilor. Stația 6 este dedicată efectuării testului de calitate, în care datele despre produs sunt citite de pe tag-ul RFID și utilizate pentru evaluarea anumitor parametrii. Testul de calitate, care are o durată semnificativă, constă în verificarea aspectelor vizuale și structurale ale produsului. În cazul în care produsul este conform cu cerințele de calitate, acesta este transferat și depozitat într-o magazie dedicată produselor conforme.

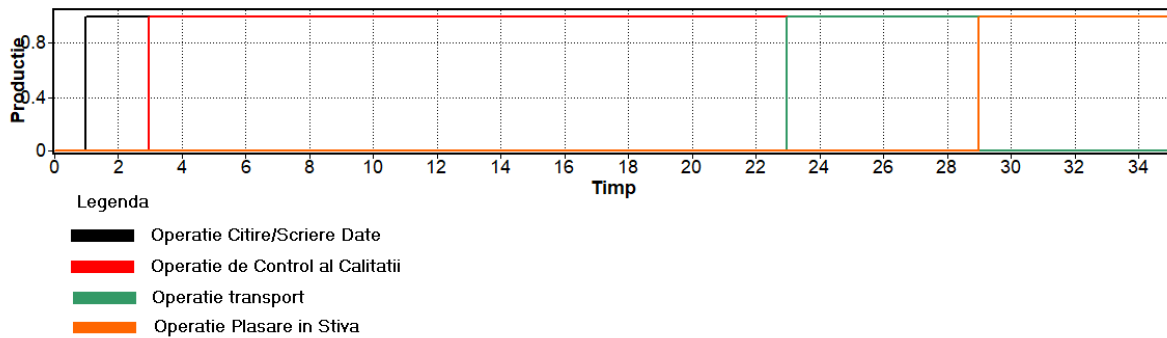


Figura 40. Rezultatele simulării modelului RPS_{S6} corespunzător operațiilor de: controlul calității, depozitare, dezasamblare din Stația 6

2.3. Rezultate și contribuții științifice

În urma modelării cu RPS a conducerii sistemului integrat cu două fluxuri de producție paralele, respectiv fabricația flexibilă în flux și fabricația flexibilă în celulă, s-au obținut modele RPS. Prin simularea modelelor RPS, rezultă date care stau la baza implementării conducerii în timp real a IFMS, cu aplicarea conceptului *Digital twin*. Modelele RPS au fost realizate pentru fiecare stație, ceea ce a permis modelarea operațiilor secvențiale, la nivel local, dar și a sincronizărilor de task-uri cu execuție paralelă, pentru sistemele interconectate funcțional.

Rezultatele simulării modelelor RPS au oferit informații în ceea ce privește soluțiile de minimizare a timpilor de așteptare, precum și pentru realizarea sincronizării fluxurilor paralele de producție. Prin simularea fabricației pe IFMS, respectiv fabricația flexibilă în celulă și fabricația flexibilă pe fluxul cele 6 stații, au rezultat concluzii, cu valoare de *ipoteză*, pentru planificarea fabricației paralele: • fabricația unui produs Tip 1, poate fi planificată ca execuție paralelă în Celula flexibilă și pe Linia pentru fabricația flexibilă în flux; • pe Linia pentru fabricația flexibilă în flux se pot planifica fabricațiile produselor Tip 1 și 2, după reguli de alternanță oferite de planificare.

Modelarea cu RPS a dinamicii proceselor din stații, pentru operațiile de fabricație flexibilă, citire și prelucrare a datelor din proces, a permis o mai bună evaluare a performanțelor IFMS. Modelele RPS au permis simularea dinamicii proceselor și identificarea eventualelor probleme – întârzieri, blocaje, nesincronizări care pot să apară în fluxul de producție. De asemenea, a fost posibilă monitorizarea și prelucrarea datelor din proces pentru a se identifica performanțele proceselor.

În această secțiune au fost atinse obiectivele subordonate **OB.2**, referitor la modelarea dinamicii procesului de fabricație flexibilă, cu integrarea conceptelor de *Industria 4.0 și 5.0*, cu accent pe *IoE și Digital twin*, respectiv **OB.2.1**. Modelarea cu Rețele Petri Temporizate (RPT) a conducerii sistemului integrat cu două fluxuri de producție paralele: fabricație flexibilă pe linie și fabricație flexibilă în celulă, cu aplicarea conceptului *Digital twin* și **OB.2.3**. Modelarea cu Rețele Petri Sincronizate (RPS) a conducerii la nivel de stații a fabricației flexibile și a structurii de citire și prelucrare a datelor din proces, cu aplicarea conceptului *Digital twin*.

Utilizarea modelelor RPS a permis evaluarea condiționărilor și sincronizărilor între procese, identificarea situațiilor critice, aspecte privind eventuale îmbunătățiri ale performanțelor producției. Implementarea conducerii proceselor și a sistemelor robotice, se va baza pe interfațarea și sincronizarea simulării modelelor RPS digitale, cu conducerea în timp real a proceselor, prin aplicarea *Digital twin*.

Implementarea conducerii la nivel de stații de lucru, coordonată cu modelele RPS, reprezintă o contribuție științifică importantă, cu implicații în reducerea timpilor de așteptare, implicit a timpului de ciclu de producție.

Demersul prezentat urmărește un scop educațional, cât și unul de cercetare avansată pentru concepția și modelarea proceselor, ca structuri integrate în lumea reală, în sensul sustenabilității fabricației și a mediului. Scopul educațional va familiariza proiectantul de sistem cu conceptul Industrie 5.0 - *Educație 5.0*, precum și cu aspecte specifice *Cyber-Physical-System*, în sensul convergenței dintre resurse hardware și cele cibernetice. Aspectul educațional este pus în valoare de utilizarea în modelare, a instrumentelor avansate, respectiv RPS. Cercetările evidențiază modelări cu RPS ale sincronizărilor de semnale achiziționate de la senzori și elemente de acționare, precum și modelări ale sincronizărilor de task-uri generate de sistemul de monitorizare. Modelele RPS vor fi utile la implementarea conducerii în timp real, cu tehnologia *Digital twin*.

Conducerea automată a operațiilor de transport și poziționare precisă în stațiile ISFM, subordonată conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0

- 3.1. Structura de conducere cu algoritm PID
 - 3.2. Algoritm de conducere cu PID bazat pe evenimente
 - 3.3. Proiectarea conducerii cu algoritm PID_E pentru transport și poziționare, în stațiile de lucru
 - 3.4. Implementarea conducerii cu PID_E a operațiilor de transport și poziționare precisă
 - 3.5. Rezultate și contribuții științifice
-

Deoarece, prin proiectarea sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, a rezultat un sistem cu două fluxuri de fabricație paralele, este importantă coordonarea cu precizie a operațiilor de poziționare a pieselor, în locații cheie, la anumite momente de timp. Această abordare a fost anticipată de modelarea cu RPS a fiecărei stații de lucru, în care, utilizarea evenimentelor de sincronizare, indică poziționarea temporală și cu precizie a unui produs aflat în execuție în stația respectivă.

Pentru a se asigura corectitudinea fabricației, produsele trebuie să ajungă cu precizie în locațiile destinate asamblării, la momente de timp prestabilite. În sistemul de fabricație considerat, transportul este realizat de liniile transportoare ale fiecărei stații, și/sau sistemul robotic SCARA. Acesta efectuează operații de manipulare și transport a pieselor, în locații prestabilite. În abordarea propusă, s-a analizat operația de transport în stație, ceea ce presupune conducerea secvențială a deplasării pe conveior, și poziționarea în punctul de lucru. Poziționarea cu precizie, a impus implementarea unei structuri de conducere a poziționării, cu compensarea perturbațiilor.

Aplicarea algoritmilor de conducere care, dincolo de funcția de control, intervin în compensarea întârzierilor semnificative din proces și rejectarea perturbațiilor, reprezintă o etapă importantă în îmbunătățirea robusteții sistemului de transport, implicit a rezilienței întregului proces de fabricație flexibilă. Prin aplicarea acestui algoritm de conducere, sistemul de fabricație va beneficia de o protecție sporită la exogenul perturbator, ceea ce asigură precizie în execuția operațiilor, și creșterea eficienței fabricației.

Dacă ne raportăm generic la o stație de lucru, poziția unui produs este măsurată în trei locații cheie, folosind senzori de detecție binari (Figura 41). Poziția unui produs, pe conveior, este măsurată la intrarea în stație, la ieșire și în zona de lucru a stației. Prin ipoteză, la un moment dat, pe conveior este prezent un singur produs. În programarea clasică a conducerii transportului în stație, o serie de evenimente sunt inițiate la activarea secvențială a senzorilor.

Acest tip de conducere asigură transportul unui produs între două puncte, fără însă a garanta deplasarea precisă, într-un interval de timp impus. Pentru ca un produs să se poziționeze într-un anumit punct, la un moment prestabilit, trebuie implementat un algoritm de compensare a erorilor de poziționare și temporale.

Prin evaluarea performanțelor procesului de asamblare, pentru o stație de lucru, a rezultat că perturbațiile care apar în procesul de poziționare într-o anumită locație, vor altera

poziția piesei la inițierea transportului în stația respectivă. Dacă deplasarea pe conveior are o durată mai lungă, atunci sistemul de transport poate compensa întârzierea prin modificarea vitezei.

Algoritmul de conducere va considera anumite limitări:

- ✓ într-un proces de fabricație, transportul urmează sensul de deplasare al conveioarelor și direcția acestora, deci produsul nu poate călătorii înapoi într-o locație. Acest lucru poate introduce erori, deoarece produsul nu va fi poziționat cu precizie într-un punct, definit de locația senzorului, ci poziționat în proximitatea acestuia.

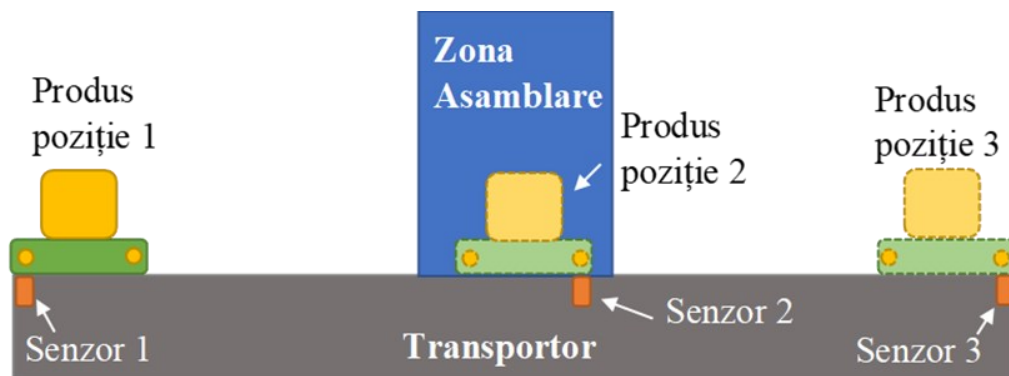


Figura 41. Poziționarea senzorilor într-o stație de lucru

- ✓ sistemul de transport are anumite limite, generate de viteza benzilor transportoare, ceea ce impune proiectarea structurii de conducere a vitezei conveiorului – mărirea de comandă, în limitele de lucru ale sistemului fizic. Comanda va fi restricționată prin saturare, la anumite valori de minim sau maxim, ceea ce garantează performanțele sistemului de transport.

Astfel în conducerea procesului de transport se propune implementarea unei structuri de conducere care să asigure deplasarea pe conveior, într-un interval de timp prestabilit, cu respectarea valorilor minime și maxime ale comenzii. S-a ales utilizarea algoritmului PID.

3.1. Structura de conducere cu algoritm PID

Controlerul PID sunt cele mai utilizate industrial, în aplicații de automatizare. Prin cele trei componente, proporțională, integratoare, derivativă, structura PID elaborează comanda procesului, cu respectarea performanțelor impuse mărimii controlate.

Ecuția intrare ($E(s)$) / ieșire ($U(s)$) a controlerului PID în formă standard, în domeniul complex s , este [87, 88]:

$$U(s) = K_R [E(s) + \frac{1}{T_I s} \cdot E(s) + T_D \cdot s \cdot E(s)] , \quad (3.1)$$

unde $U(s)$ reprezintă semnalul de ieșire al controlerului PID, respectiv comanda procesului. Valoarea acestui semnal este dependentă de valoarea erorii $E(s)$ a sistemului condus, eroare definită ca fiind diferența dintre referința $R(s)$ și valoarea ieșirii sistemului $Y(s)$.

Ecuția de control, compusă din cele trei componente - proporțională, integratoare și derivativă, U_P, U_I, U_D , permite modificarea comenzii $U(s)$, prin acordarea parametrilor

controlerului, respectiv prin modificarea parametrul K_R , în timp ce constantele de timp integral T_I și timp derivativ T_D , se fixează [89].

Prin modificarea parametrului K_R se controlează amplitudinea semnalului de comandă generat de controler. O valoare prea mare a acestui parametru, determină o comandă cu suprareglaj mare și oscilații nedorite ale răspunsului. Pe de altă parte, dacă parametrul este setat la o valoare prea mică, controlerul va fi lent și poate produce un răspuns, situat sub valoarea minimă acceptată a comenzii [90].

Parametrul T_I reprezintă constanta de timp de integrare a componentei integratoare a controlerului. Acesta reprezintă timpul necesar pentru a integra semnalul de eroare și pentru a ajusta semnalul de comandă. Cu cât valoarea lui T_I este mai mare, cu atât integrarea semnalului de eroare este mai lentă, ceea ce poate conduce la o comandă lentă [90].

Parametrul T_D reprezintă constanta de timp de derivare, fiind specifică termenului derivativ. Acesta reprezintă timpul necesar pentru a deriva semnalul de eroare și pentru a ajusta semnalul de comandă în funcție de schimbările rapide ale erorii în timp. Cu cât valoarea lui T_D este mai mare, cu atât controlerul are o acțiune mai rapidă și mai agresivă, ceea ce este benefic pentru reducerea suprareglajului și îmbunătățirea răspunsului [90].

În cadrul abordării paralele a controlerului PID, structura pe componente este:

$$\begin{cases} U_P(s) = K_P \cdot E(s) \\ U_I(s) = \frac{K_I}{s} \cdot E(s) \\ U_D(s) = K_D \cdot s \cdot E(s) \end{cases}, \quad (3.2)$$

cu K_P - parametrul de acordare a componentei proporționale, K_I - parametrul de ajustare a componentei integratoare și K_D - al componentei derivate. Componenta derivativă a unui PID poate fi sensibilă la zgomot, ceea ce poate conduce la instabilitatea comenzii. De aceea, adăugarea unui filtru trece-jos, în componenta derivativă, reduce zgomotul și îmbunătățește performanțele răspunsului. Astfel, componenta derivativă cu filtru trece-jos este:

$$U_D(s) = \frac{N \cdot K_D \cdot s}{K_D \cdot s + N} \cdot E(s), \quad (3.3)$$

cu N frecvența de întrerupere [91].

În cazul unui proces real, comenzile transmise de sistemul de conducere trebuie să se încadreze în limitele admisibile ale elementelor de execuție. Astfel, pentru a asigura o corelare optimă între controler și limitările fizice ale sistemului, se propune un set de reguli de saturație a comenzii. Astfel se va limita amplitudinea comenzii, care va fi inferioară limitelor admisibile ale elementelor de execuție, pentru a se obține stabilitatea structurii de conducere, precum și performanțele impuse răspunsului [91]

$$\begin{cases} U_{Command}(s) = U_{Inferior} & , \text{dacă } U(s) < U_{Inferior} \\ U_{Command}(s) = U(s) & , \text{dacă } U_{Inferior} \leq U(s) \leq U_{Superior} \\ U_{Command}(s) = U_{Superior} & , \text{dacă } U(s) > U_{Superior} \end{cases} \quad (3.4)$$

Dacă se implementează regulile de saturație, există riscul ca factorul integrator din controlerul PID să introducă întârzieri și să genereze oscilații nedorite, ale răspunsului. Pentru a preveni aceasta, se propun metode *anti-windup*. Metodele *anti-windup* constau în

dezactivarea factorului integrator, cât timp comanda transmisă sistemului de control se situează în afara limitelor dorite [91]. Astfel se evită acumularea excesivă a erorii de reglare. O metodă de *anti-windup* des întâlnită este cea de *clamping*, prin care se limitează ieșirea din componenta integratoare, implicit modificarea comenzii care va avea valori egale cu limita superioară, sau inferioară a nivelului de saturație, atunci când comanda depășește limitele de saturație. Odată ce comanda revine în intervalul acceptat, componenta integratoare își reia funcționarea normală. În acest fel, se asigură un răspuns rapid și stabil al sistemului de control, fără riscul de a genera oscilații nedorite sau deteriorarea elementelor de execuție.

Având în vedere funcția de transfer a controlerului PID în domeniul S, se poate determina legea de reglare în domeniul timpului discret [92]:

$$u(t_k) = u_P(t_k) + u_I(t_k) + u_D(t_k), \quad (3.5)$$

cu $u(t_k)$ - valoarea de control în domeniul timpului discret, cu componentele $u_P(t_k)$, $u_I(t_k)$, $u_D(t_k)$, pentru componentele: proporțională, integratoare și derivativă. Se consideră $t_k = k \cdot \bar{h}$ reprezentând momentul eșantionării, având \bar{h} perioada de eșantionare constantă. Similar cu relația controlerului de timp continuu în domeniul S, relația este similară în domeniul Z pentru timp discret. Componenta proporțională are ca rezultat [93]:

$$U_P(z) = K_P \cdot E(z), \quad (3.6)$$

cu forma în timp discret

$$u_P(t_k) = K_P \cdot e(t_k). \quad (3.7)$$

În cazul componentelor integratoare și derivate ale controlerului PID, acestea sunt approximate prin aplicarea unor algoritmi specializați. Metoda Backward Difference Approximation, constă în înlocuirea derivatei cu o diferență finită. Se calculează diferența dintre valoarea funcției în punctul actual și cea din în punctul anterior [94]. Se obține $s = \frac{1-z^{-1}}{\bar{h}}$ ceea ce conduce la echivalentele

$$\begin{cases} U_I(z) = \frac{K_I \cdot \bar{h}}{1-z^{-1}} E(z) \\ U_D(z) = \frac{N \cdot K_D (1-z^{-1})}{(N \cdot \bar{h} + K_D) - K_D \cdot z^{-1}} \end{cases}. \quad (3.8)$$

Aceste relații, în domeniul de timp discret devin

$$\begin{cases} u_I(t_k) = u_I(t_k - 1) + K_I \cdot \bar{h} \cdot e(t_k) \\ u_D(t_k) = \frac{K_D}{K_D + N \cdot \bar{h}} \cdot u_D(t_{k-1}) + \frac{NK_D}{K_D + N \cdot \bar{h}} \cdot (e(t_k) - e(t_{k-1})) \end{cases}. \quad (3.9)$$

3.2. Algoritm de conducere cu PID bazat pe evenimente

Cercetările publicate în literatura de specialitate privind controlerile PID bazate pe evenimente (PID_E) - *PID event triggers*, propun implementarea unei legi de reglare bazată de mărimi de intrare, de tip eveniment. Se propune utilizarea a două sisteme distincte: un dispozitiv de achiziție care detectează evenimentul, și un controler PID care elaborează comanda în baza evenimentului detectat. Controlerul elaborează o nouă comandă la fiecare

eveniment detectat, iar această comandă acționează cu valoare constantă, până în momentul detectării următorului eveniment. În această abordare, un *eveniment_1* este definit ca semnal declanșat, în momentul depășirii unei valori prestabilite a erorii. Aceasta este calculată prin diferența dintre valoarea de referință, a mărimii controlate și semnalul achiziționat prin monitorizarea mărimii controlate. În mod similar, un *eveniment_2* se declanșează dacă durata depășește o valoare de timp prestabilă, considerând ca punct de inițializare ultima detectare a evenimentului. În ambele situații, sistemul de detecție al evenimentelor transmite controlerului valoarea erorii și un semnal de declanșare.

Similar cu controlerul PID cu eșantionare în timp, detectorul de evenimente măsoară la intervale de timp prestabilite, valoarea mărimii controlate, plecând de la o perioadă de eșantionare \bar{h} . Sistemul de detecție a evenimentelor, transmite semnalul de activare către controlerul PID, atunci când valoarea erorii depășește o limită predefinită, considerată eveniment. În literatura de specialitate, evenimentul declanșator este adesea definit ca valoarea absolută a erorii, $e(t_k)$ care depășește un nivel predefinit \bar{e} . Astfel, condiția de asociere a valorii erorii, cu un eveniment este definită prin următoarea inegalitate [95]:

$$|e(t_k)| \geq \bar{e}, \quad (3.10)$$

unde $t_k = \sum_k h_k$ reprezintă momentele de timp generate prin eșantionare cu $h_k = t_k - t_{k-1}$. Durata perioadei de eșantionare este determinată prin două detecții succesive ale unui eveniment, care corespund valorii erorii, la depășirea unui prag prestabilit.

După detectarea unui eveniment, controlerul PID_E actualizează semnalul de comandă prin utilizarea măsurătorilor primite de la detectorul de evenimente, în raport cu valoarea anterioară a comenzii. Astfel, comanda este menținută la valoare constantă, pe durata unui interval de timp h_k și este modificată atunci când este detectat un alt eveniment, în intervalul următor [96]. Aplicarea metodei Backward Difference Approximation pentru aproximarea componentelor integrale și derivate conduce la următoarele relații:

$$\begin{cases} u_I(t_k) = u_I(t_{k-1}) + K_I \cdot h_k \cdot e(t_k) \\ u_D(t_k) = \frac{K_D}{K_D + N \cdot h_k} \cdot u_D(t_{k-1}) + \frac{N \cdot K_D}{K_D + N \cdot h_k} \cdot (e(t_k) - e(t_{k-1})) \end{cases} \quad (3.11)$$

unde h_k înlocuiește perioada constantă \bar{h} în ecuația (3.9) .

Luând în considerare relația (3.10), care exprimă condiția de declanșare a evenimentului, asociat depășirii valorii prestabilite a erorii de referință, rezultă că intervalul de activare poate deveni foarte lung, în special atunci când variația ieșirii este foarte mică. Pentru a atenua această problemă, se aplică componente de compensare a întârzierilor mari, în special pentru componentele integratoare și derivate ale controlerului PID_E. Dacă intervalul de activare este considerabil lung, impactul acestor componente asupra mărimii de comandă poate fi redus, în abordare asemănătoare cu metoda *anti-windup*, aplicată pentru compensarea erorilor, atunci când mărimea de comandă este saturată [97].

Pentru termenul integrativ, funcția exponențială determină scăderea impactului intervalului de activare pe măsură ce durata regimului de echilibru crește:

$$h_{exp}^I(h_k) = h_k e^{a_I(h_{old} - h_k)}, \quad (3.12)$$

cu a_I utilizat pentru a pondera influența intervalului de activare.

În cazul componentei derivate, rezultă:

$$h_{exp}^D(h_k) = h_{old} + (h_k - h_{old}) \cdot e^{a_D(h_{old} - h_k)}, \quad (3.13)$$

cu a_D folosit pentru a pondera influența factorului exponențial. Rezultată că valoarea lui $h_{exp}^D(h_k)$ va fi apropiată de h_k , atunci când durata dintre două evenimente succesive este mică. În mod similar, valoarea lui $h_{exp}^D(h_k)$ va fi mai aproape de ultima perioadă de activare h_{old} , atunci când durata dintre două activări succesive este mai mare [95].

Folosind aceste îmbunătățiri, se obține un PID cu compensare, astfel încât componentele integratoare și derivate devin:

$$\begin{cases} u_I(t_k) = u_I(t_k - 1) + K_I \cdot h_{exp}^I(h_k) \cdot e(t_k) \\ u_D(t_k) = \frac{K_D}{K_D + N \cdot h_{exp}^D(h_k)} \cdot u_D(t_{k-1}) + \frac{N \cdot K_D}{K_D + N \cdot h_{exp}^D(h_k)} \cdot (e(t_k) - e(t_{k-1})) \end{cases} \quad (3.14)$$

3.3. Proiectarea conducerii cu algoritm PID_E pentru transport și poziționare, în stațiile de lucru

Deoarece metoda de conducere bazată pe evenimente, prezentată în literatura de specialitate, nu poate fi aplicată în forma existentă, s-au propus unele modificări pentru acest tip de control. Prin ipoteză se cunosc numărul și tipul senzorilor, ceea ce presupune modificarea algoritmului de conducere, respectiv a modului de activare a controlerului. Se consideră că produsul este localizat prin detecție, poziția lui va fiind monitorizată doar în anumite poziții cheie, în care sunt amplasați senzori de poziție. Acesta conduce la proiectarea unui nou algoritm de control.

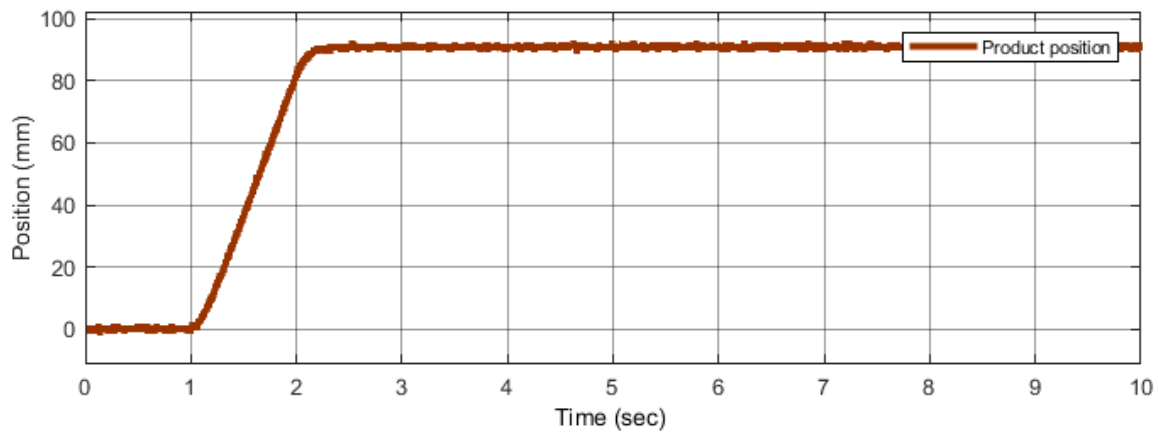
În procesul de proiectare a unui algoritm de conducere eficient, pentru o stație dotată cu conveior, a fost necesară identificarea funcției de transfer asociată procesului de transport pe conveior. Pentru aceasta, s-au folosit utilitare specializate ale software-ului Matlab, **PID Tuner_Plant Identification**, care au condus la identificarea funcției de transfer, prin analiza unui set de măsurători experimentale, relativ la mărimile de intrare/ieșire din sistemul de transport și poziționare. După identificarea modelului procesului, respectiv a funcției de transfer, s-a procedat la simularea transportului pe conveior (Figura 42.a). Rezultatele simulării au fost corelate cu monitorizarea în timp real a mărimilor de intrare și ieșire, din sistemul de transport pe conveior.

Vectorii de date experimentale au fost preluați în utilitarul software Matlab **PID Tuner_Plant Identification**. Prin tehnici de prelucrare oferite de utilitarul *Plant Identification* s-a obținut funcția de transfer care aproximează dinamica procesului:

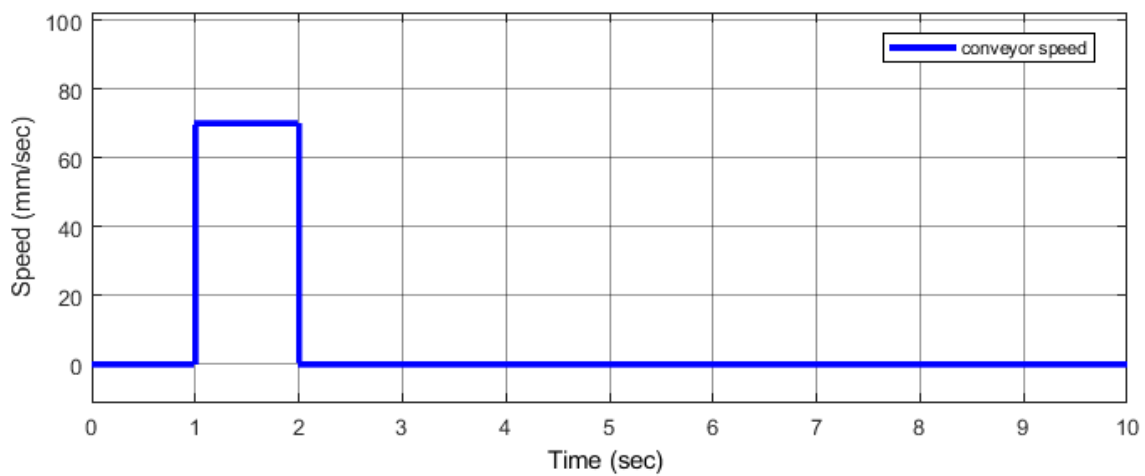
$$H(s) = \frac{1.3}{0.1s^2 + s} \quad (3.15)$$

Analizând cele două grafice prezentate în Figura 42, se observă că există o întârziere în răspuns, datorată accelerării și decelerării motoarelor. Aceste întârzieri sunt explicitate în funcția de transfer, asociată sistemului de transport. De asemenea, prin accelerări și decelerări ale vitezei conveiorului, se introduc erori de poziționare, determinate de controlul secvențial. În Figura 42, sunt reprezentate erorile de poziționare, atunci când semnalul de comandă

încetează. În acest caz sistemul începe decelerarea, iar produsul continuă deplasarea, până în poziția de stabilizare.



a)



b)

Figura 42. a) Monitorizarea poziției produsului, pe conveyor; b) Monitorizarea conducerii sistemului de transport

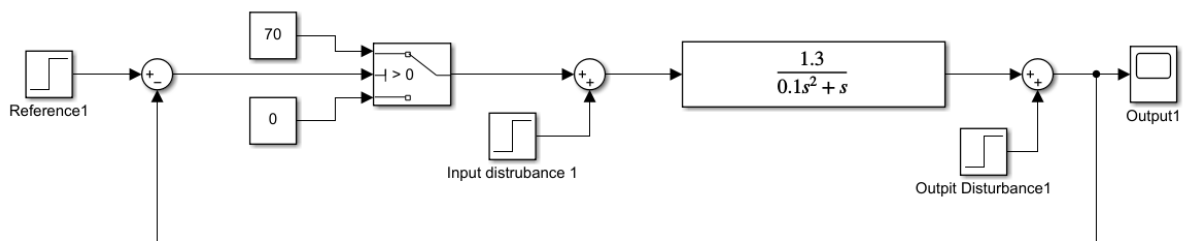


Figura 43. Model Simulink al structurii de conducere a transport și poziționare de precizie pe conveyor, sub acțiunea perturbațiilor

În vederea compensării acestor erori, a fost implementată o structură de conducere cu controler PID_E. În analiza răspunsului, au fost luate în considerare perturbațiile comenzii - perturbații aditive pe intrare, cât și pe mărimea de ieșire. În structura de conducere a sistemului de transport (Figura 44), s-a constatat că perturbațiile comenzii sunt cauzate de circuitele de control ale motoarelor conveyorului, care lucrează numai cu valori întregi. Perturbațiile aditive pe ieșire (poziția produsului pe conveyor), sunt cauzate de erorile de măsurare ale senzorilor.

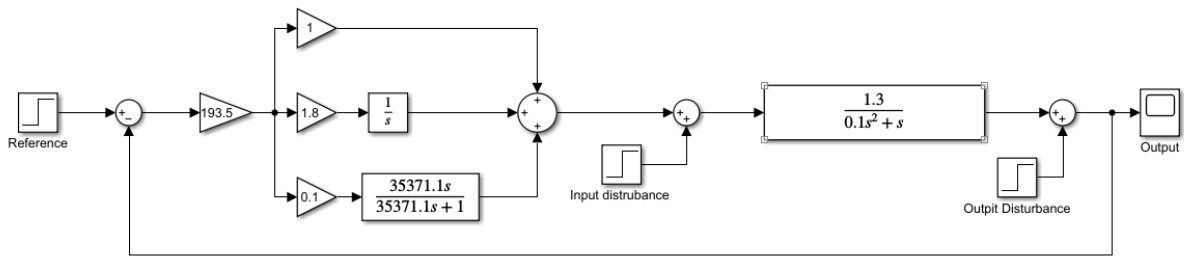
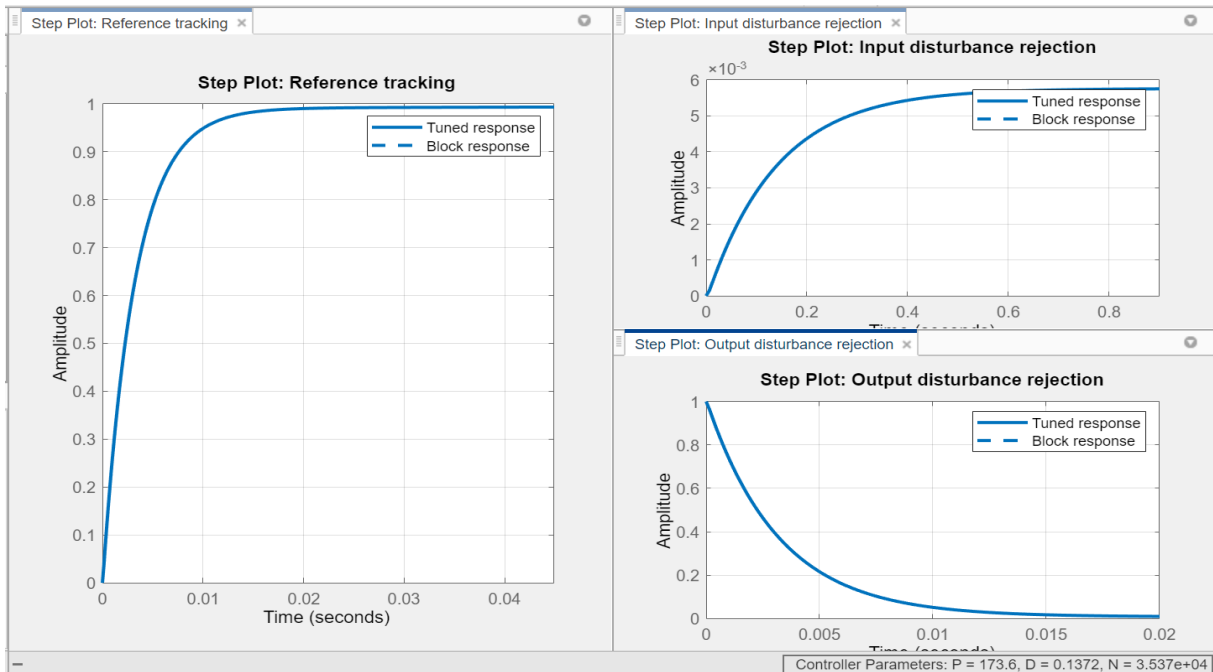
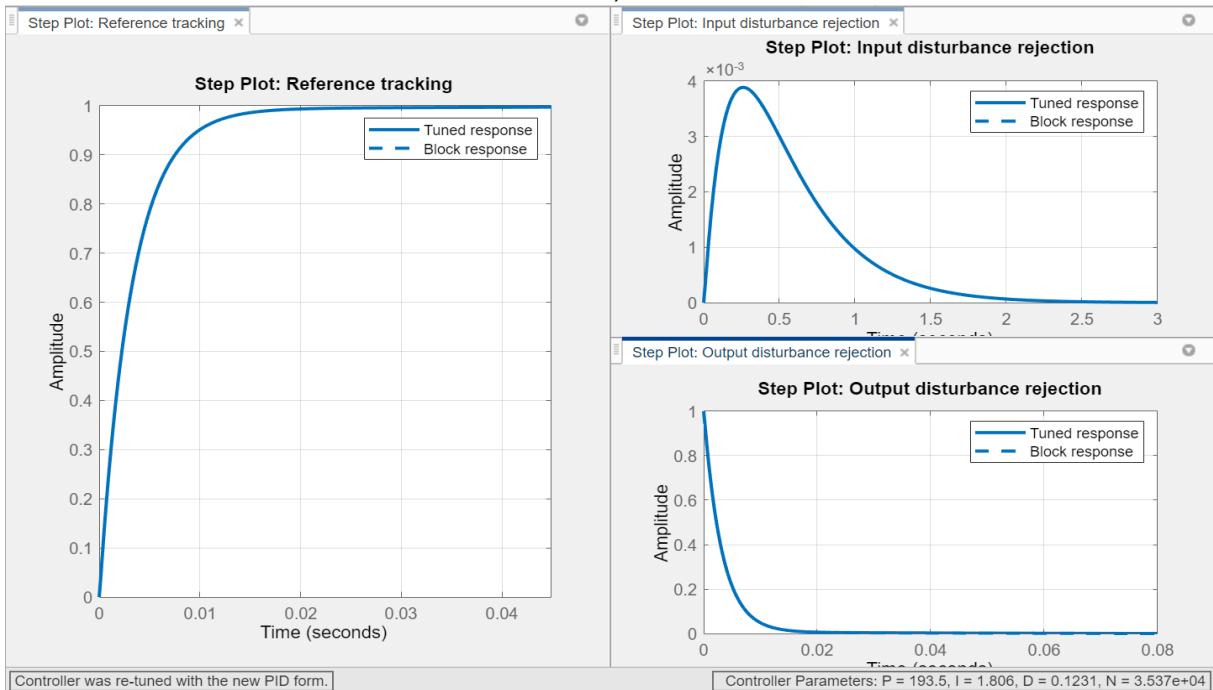


Figura 44. Model Simulink corespunzător structurii de conducere cu PID, sub acțiunea perturbațiilor



a)



b)

Figura 45. a) Rezultatele simulării în Matlab PID Tuner a structurii de conducere cu PD, sub acțiunea perturbațiilor; b) Rezultatele simulării în Matlab PID Tuner a structurii de conducere cu PID, sub acțiunea perturbațiilor.

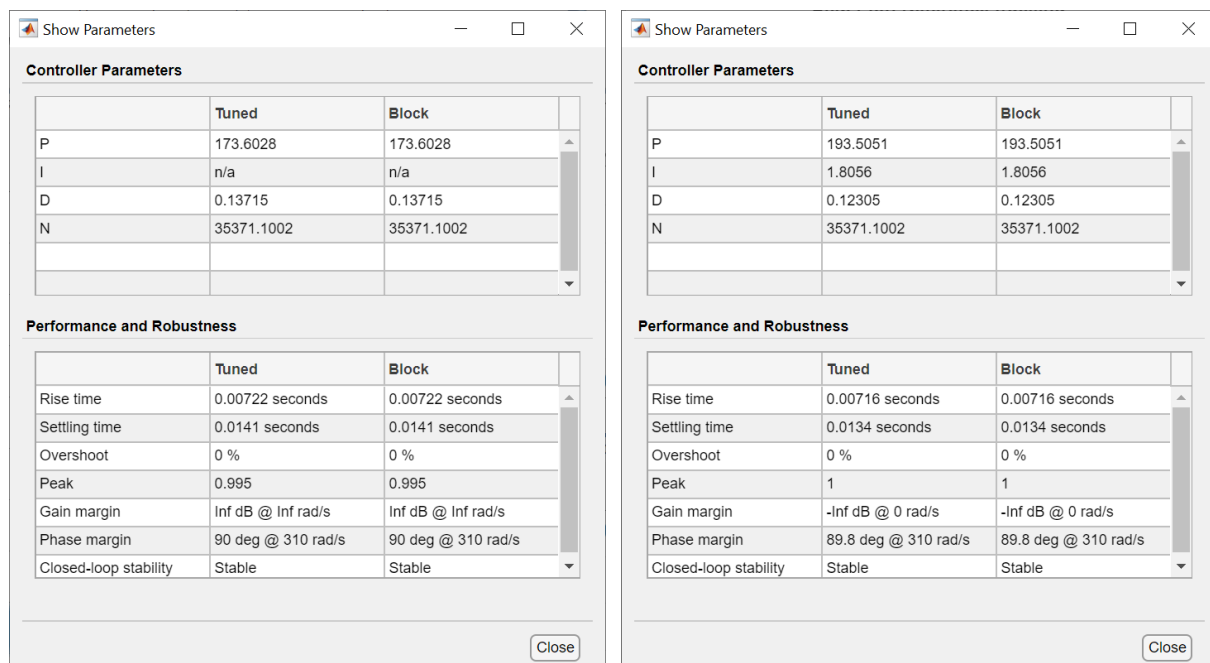
În Figura 45 sunt prezentate două scenarii de conducere a procesului obținute prin utilizarea utilitarului PID Tuner, în care se propun structuri de conducere cu două controlere: PD și PID.

Pentru cele două structuri de conducere, au fost evaluate prin simulare:

- ✓ mărimea de ieșire din proces (poziția pe conveior) în absența perturbațiilor – respectiv urmărirea referinței treaptă unitară (*Step plot: Reference tracking*)
- ✓ mărimea de ieșire din proces (poziția pe conveior) dacă se consideră semnale perturbatoare treaptă unitară, aplicate aditiv pe comandă (*Step plot: Input disturbance rejection*)
- ✓ mărimea de ieșire din proces (poziția pe conveior) dacă se consideră numai perturbații treaptă unitară aplicate aditiv pe ieșire, respectiv poziția pe conveior (*Step plot: Output disturbance rejection*).

S-au efectuat simulări, urmate de analize ale rezultatelor în două cazuri: structura de conducere cu controler PD și structura de conducere cu controler PID, cu evaluarea performanțelor răspunsului, respectiv a poziționării de precizie. Obiectivul a constat în acordarea parametrilor celor două controlere, astfel încât să se minimizeze timpul de creștere și timpul de stabilizare al răspunsului. În plus, s-a urmărit rejectarea perturbațiilor aplicate pe intrarea și pe ieșirea procesului. În testele de simulare, s-a considerat că perturbațiile cu acțiune pe intrarea și ieșirea procesului, sunt semnale treaptă unitară.

În Figura 46 sunt prezentați parametrii controlerului și performanțele răspunsului în cele două cazuri: structura de conducere cu PD, și structura de conducere cu PID. Evaluările au fost efectuate prin utilizarea utilitarului **Matlab_PID Tuner**.

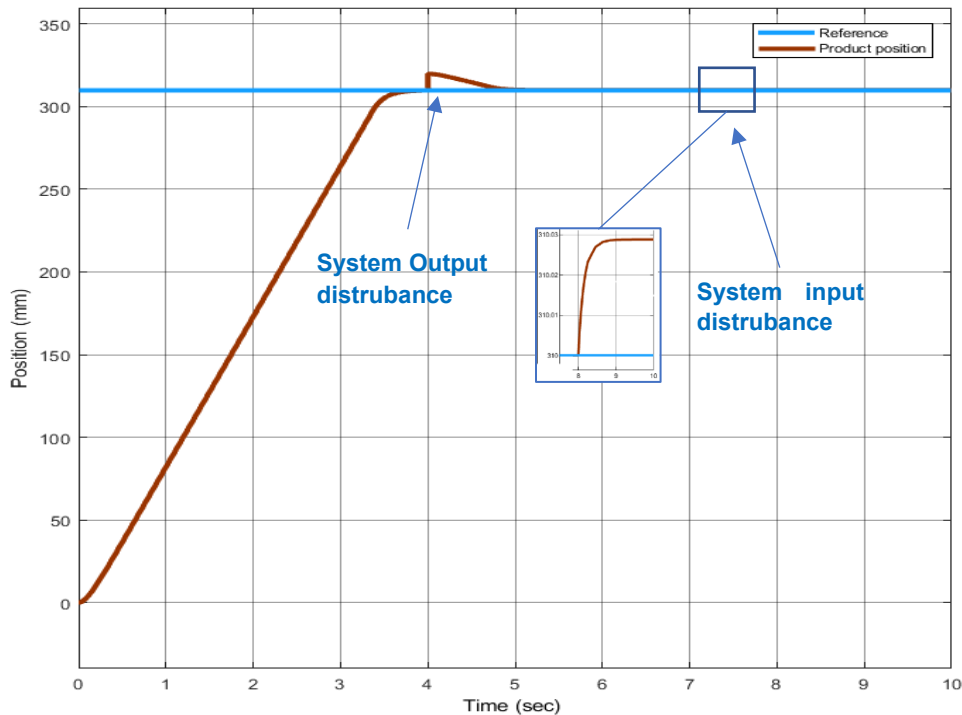


a)

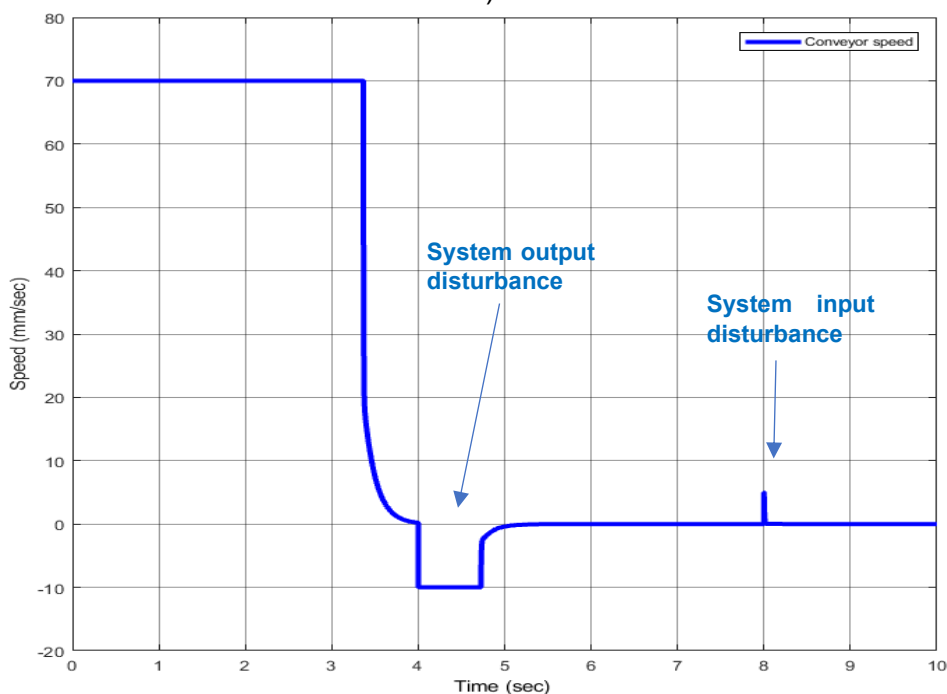
b)

Figura 46. a) Parametrii controlerului, performanțele și robustețea pentru conducerea cu algoritm PD; b) Parametrii controlerului, performanțele și robustețea răspunsului pentru conducerea cu algoritm PID

În cele două cazuri se obțin performanțe comparabile ale răspunsului, în absența perturbațiilor (*Reference tracking*). Diferențele notabile între cele două structuri de conducere sunt ale mărimii de ieșire, în raport cu acțiunea de rejectarea a perturbațiilor, aplicate aditiv pe intrarea și ieșirea sistemului. În cazul compensării perturbațiilor aplicate pe ieșire, structura de reglare în bucla închisă cu reacție unitară negativă și controler PID, asigură performanțe bune, timpul de atenuarea a perturbațiilor fiind mult scăzut.

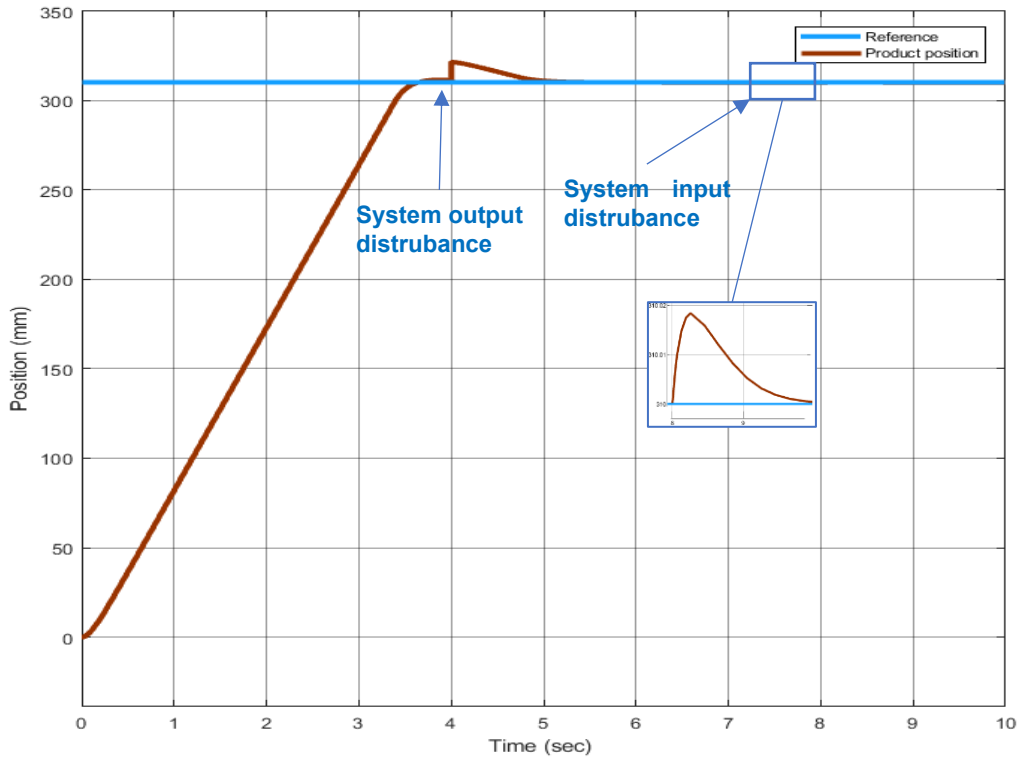


a)

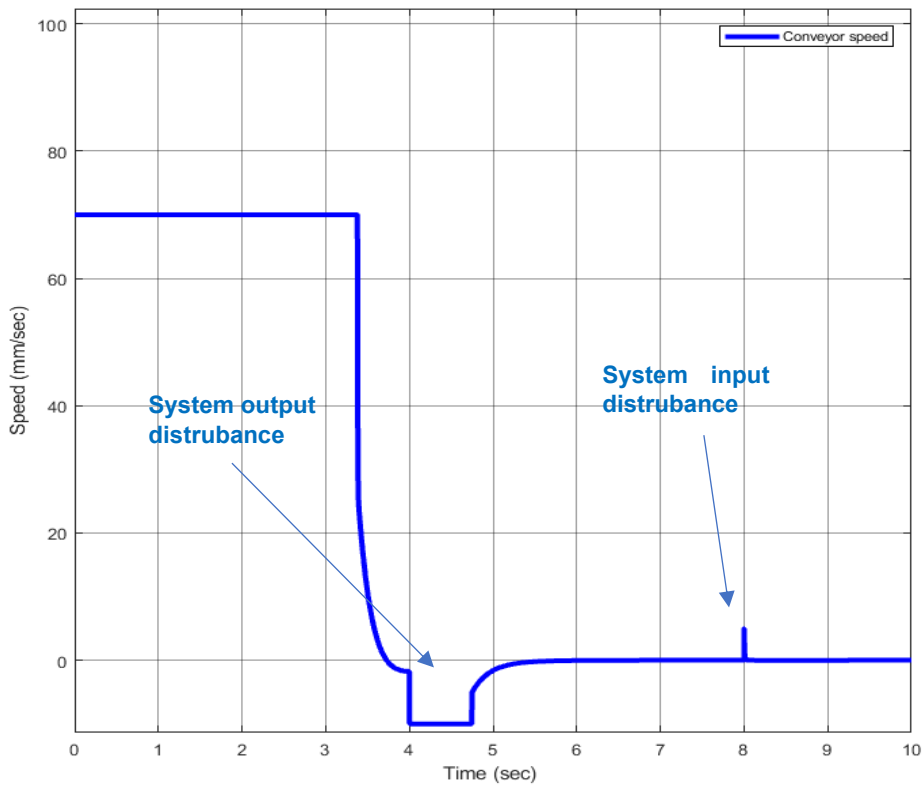


b)

Figura 47. Rezultate ale simulării conducerii cu PD a procesului de transport și poziționare, sub acțiunea perturbațiilor: a) Poziționarea în raport cu referința și; b) viteza de transport a benzii transportoare



a)



b)

Figura 48. Rezultate ale simulării conducerii cu PID a procesului de transport și poziționare, sub acțiunea perturbațiilor: a) Poziționarea în raport cu referința și; b) viteza de transport a benzii transportoare

În cazul conducerii cu algoritm PID sub acțiunea perturbațiilor aditive pe comandă, se obțin performanțe mai bune. În cazul controlerului PD, perturbațiile nu se atenuază,

determinând o eroare staționară a mărimii de ieșire a procesului. Conducerea cu controler PID atenuază perturbațiile, determinând o eroare staționară nulă a mărimii de ieșire a procesului. Structura de conducere cu algoritm PID este superioară celei cu PD, mai ales din punctul de vedere al rejectării perturbațiilor.

În Figura 47 și Figura 48, sunt prezentate rezultatele simulării conducerii, cu controlerul PD și PID, pentru operațiile: transport pe conveyer, respectiv poziționarea de precizie. Această simulare are ca scop rafinarea performanțelor răspunsului, prin modificarea parametrilor controlerelor (acordarea reguletoarelor). Un aspect esențial în obținerea performanțelor dorite este anularea suprareglajului, precum și obținerea unei erori staționare zero, în cazul poziționării în punctul de lucru al stației.

Astfel în urma simulărilor se poate realiza o comparație între rezultatele furnizate de cele două structuri de conducere. În cazul conducerii cu controler PD nu se înregistrează suprareglaj pentru mărirea de ieșire (poziționarea pe conveyer). Dacă însă se consideră acțiunea perturbațiilor aditive pe intrare, mărirea de ieșire va avea eroare staționară. Perturbațiile aditive pe ieșirea procesului, sunt rapid anulate de acest tip de controler.

În urma evaluării comparative a performanțelor răspunsului pentru cele două structuri de conducere, se pot face următoarele aprecieri: acțiunea controlerului PID conduce la performanțe superioare în ceea ce privește rejectarea perturbațiilor aplicate la intrare și asigură eroare de poziție nulă. Deși rejectarea perturbațiilor cu acțiune pe ieșire este mai lentă, controlul cu regulator PID are comportament unei structuri cu robustețe ridicată, în raport cu structura cu controler PD.

Considerând abordarea propusă în literatura de specialitate privind controlul PID_E, respectiv *PID event triggers*, bazat pe *eveniment_1* - semnal declanșat în momentul depășirii unei valori prestabilite a erorii se propune un algoritm nou, Algoritmul 1. Prin Algoritmul 1 se propune înlocuirea semnalului de declanșare bazat pe nivelul de eroare, cu un semnal nou de declanșare bazat pe poziția produsului. Semnalul de activare este trimis către partea de control, când un anumit senzor este activ. Prin evaluarea poziției produsului pe transportor și considerând referința pre-stabilită în etapa de proiectare a stațiilor, algoritmul calculează viteza și o trimite la motorul transportorului.

Cunoscând pozițiile senzorilor, respectiv locațiile cheie, după activarea algoritmului produsul se va deplasa în a doua locație cheie, și va activa al doilea senzor. Procesul intră în etapa de așteptare a finalizării execuției operației din postul de lucru, urmată de stabilirea următoarei poziții de referință. Deoarece între senzori, nu se poate măsura poziția produsului, algoritmul memorează ultima poziție cunoscută a acestuia.

În cazul stațiilor de lucru, algoritmului de conducere este executat la activarea senzorilor amplasați la intrare, în zona de asamblare și la ieșirea din stația de lucru. Algoritmul de conducere bazat pe evenimente - „*Algoritm PID_E: Algoritm pentru conducerea cu PID bazat pe evenimente*” calculează mărirea de conducere a sistemului de transport între două locații.

Algoritm PID_E: Algoritm pentru conducerea cu PID bazat pe evenimente

```
Intrări:  y_ref //poziția de referință
          y //poziția produsului
          // evenimentul de activare determinat de senzori
          actv= 1, dacă unul dintre senzori este activ
              0, în caz contrar
Ieșiri:  u_com //viteza transportorului
```

```

1 //Calcularea timpului între activări: t_pres = t_pres + t_nom
2 if (actv = 1)
3     er = y_ref - y
4     up = K * (beta * y_ref - y)
5     ud = Td/(N * t_pres + Td) * ud_old - K * Td * N/(N * t_pres +
6     Td) * (y - y_old)
7     ui = ui_old + K/Ti - t_pres * e
8     u = up + ui + ud
9 //saturarea și anti-windup
10    if (u < u_inferior) then //valoarea comenzi sub o anumită limită
11        u_com = u_inferior
12        ui = ui_old
13    else if (u > u_superior) then //valoarea comenzii peste o
14    anumită limită
15        u_com = u_superior
16        ui = ui_old
17    else
18        u_com = u
19        ui = ui_old + K/Ti - t_pres * e
20    end
21 end
22 //modificarea valorilor
23 ui_old =ui
24 ud_old =ud
25 y_old = y
26 t_pres = 0 //resetarea timpului
27 End

```

3.4. Implementarea conducerii cu PID_E a operațiilor de transport și poziționare precisă

În urma proiectării și a evaluării rezultatelor simulărilor, a fost implementat Algoritmul PID pentru conducerea bazată pe evenimente, a procesului de transport din Stația 2. După implementare, au fost efectuate o serie de măsurători: pe lângă întârzierile generate de operațiile de calcul ale comenzii, în procesul de conducere se introduc întârzieri suplimentare, generate de transmiterea informațiilor în proces. Acestea sunt evidențiate de diferențele dintre duratele calculate, generate de algoritm, și duratele măsurate. Aceleași valori pot fi determinate prin simulări ale modelului RPT, asociat algoritmului de conducere a operațiilor de transport și poziționare, în stații (Figura 49). Modelul cu RPT relativ la o stație, poate fi considerat model generic, pentru oricare din cele șase stații de lucru ale sistemului integrat pentru fabricația flexibilă.

Prima operație, în procesul de transport al unei stații, este operația de transfer a produsului din stația anterioară, inițiat de activarea primului senzor. Aceasta este urmată de activarea algoritmului de conducere și de calculul valorii de comandă. Acest semnal este trimis către sistem, pentru a declanșa semnalul de inițiere a transportului produsului. Când produsul ajunge la al doilea senzor, se inițiază operația de asamblare. După terminarea operațiunii de asamblare, se recalculează o nouă valoare de comandă. După ce este actualizată valoarea

comenzii, se reinițializează operația de transport. Când produsul este detectat de al treilea senzor, va fi lansată operația de transfer la stația următoare.

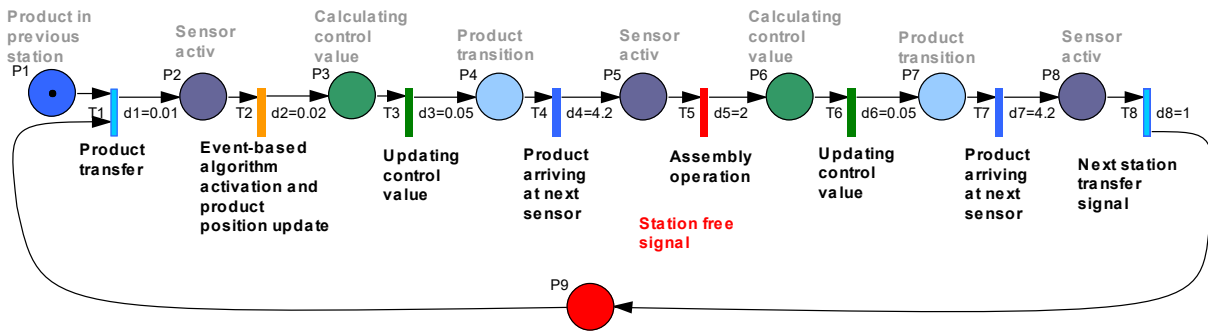


Figura 49. Modelul RPT asociat algoritmului PID_E, pentru controlul operațiilor de transport și poziționare în stație

Figura 50 indică durata fiecărei etape a procesului, de la activarea algoritmului până la transferul produsului, către următoarea stație de lucru. Din durata de actualizare a conducerii, se deduce timpul necesar calculului valorii de comandă, și a transmiterii informațiilor către transportor. Valoarea duratelor, poate influența performanțele sistemului de producție, implicit algoritmi de planificare optimă.

Pe baza rezultatelor simulării, a fost implementat un algoritm bazat pe evenimente și au fost efectuate o serie de măsurători ale mărimilor de proces. Pe lângă calculul valorii de comandă, o serie de operații de elaborare și transmitere a informațiilor, introduc întârzieri în funcționarea sistemului. Acestea pot fi evaluate ca diferențe dintre duratele de calcul, induse de algoritm și cele determinate prin monitorizarea în timp real. Similar, întârzierile în funcționarea procesului se pot obține și prin simularea modelului RPT asociat algoritmului PID_E (Figura 49).

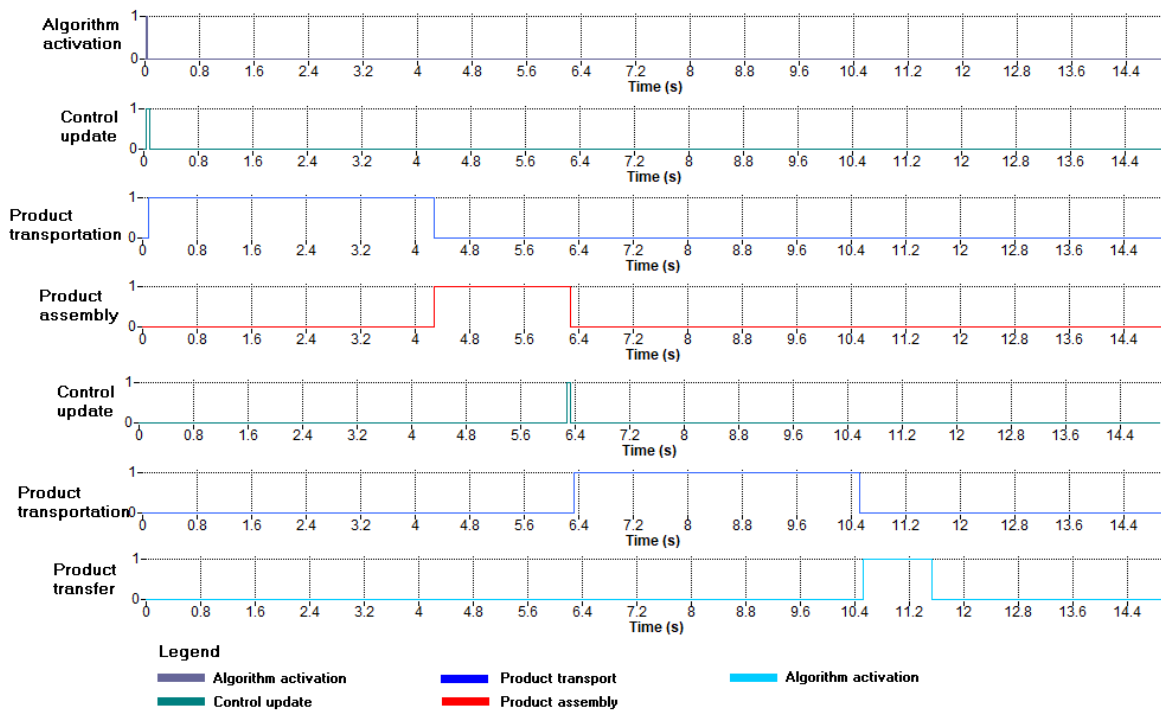


Figura 50. Simularea modelului RPT corespunzător conducerii cu algoritm PID_E și controlul operațiilor de transport, poziționare, asamblare, cu evaluarea duratelor și sincronizărilor operațiilor

Pentru simplificarea modelului s-au luat în considerare prima activare a algoritmului de conducere, și duratele corespunzătoare calculului valorii de comandă a transportului, până în poziția celui de-al doilea senzor. Acest lucru permite o modelare uniformă a proceselor din stații.

Prima operație a procesului de transport din stația curentă, este asociată cu transportul anterior, respectiv cu transferul produsului din stația anterioară, și activarea primului senzor. Aceasta este urmată de activarea algoritmului de conducere și de calculul valorii de comandă. Această comandă este trimisă către sistem, pentru inițierea transportului. După ce produsul ajunge la al doilea senzor, începe operația de asamblare. După terminarea operației de asamblare, algoritmul inițiază calculul valorii de comandă. Cu valoarea de comandă actualizată, se declanșează un nou transport. Când produsul ajunge la al treilea senzor, va fi transferat la stația următoare.

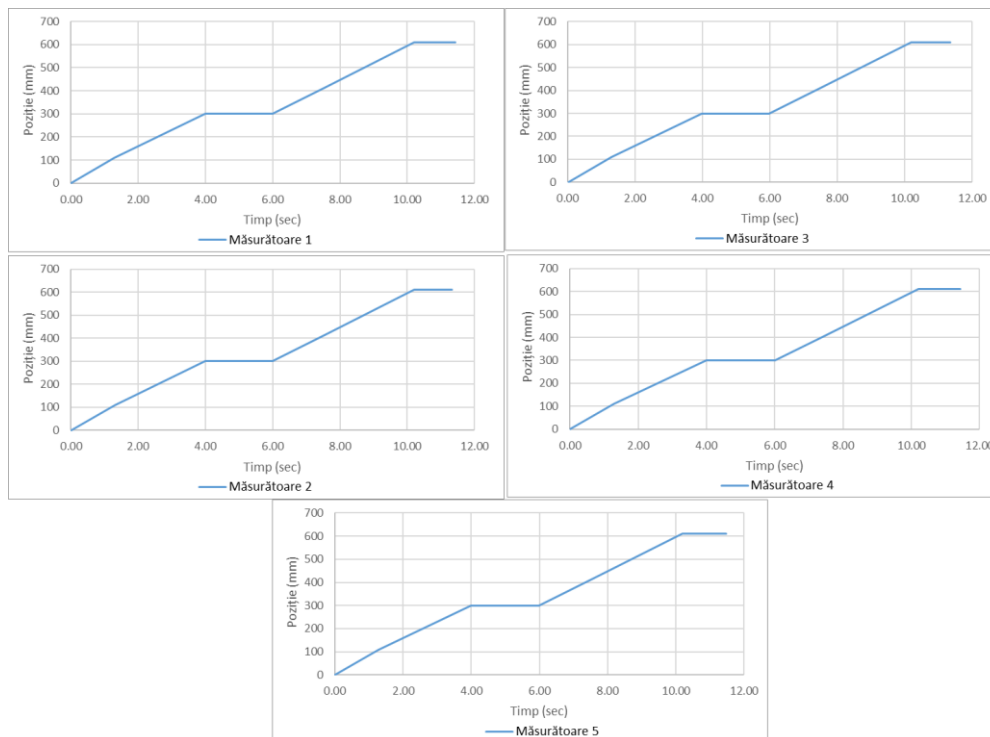


Figura 51. Monitorizarea pozițiilor succesive pentru conducerea cu Algoritm PID_E

În Figura 51 și Figura 52 sunt prezentate rezultatele monitorizării valorilor de comandă, livrate de algoritmul de conducere și poziționare a produsului, obținute prin implementarea **Algoritmului PID_E**. S-a efectuat un set de cinci măsurători, pentru a se determina repetabilitatea valorilor, și identificarea posibilele perturbații. Aceste măsurători s-au bazat pe structura de conducere cu algoritm PID, cu parametrii determinați anterior (Figura 46).

Implementarea unui algoritm de conducere secvențial, poate considera modelarea sistemului de producție cu RPT. Modelul RPT impune stabilirea succesiunii acțiunilor care se vor executa la activarea senzorului. În modelul RPT, valorile comenzii sunt predefinite pentru a se asigura o viteză optimă de lucru. Prin simularea modelului RPT, rezultă valori ale vitezei maxime de transport, similare cu cele furnizate de algoritmul PID_E. În acest caz, comanda procesului este menținută constantă, pe măsură ce produsul este transportat în poziții intermediare pozițiilor de referință. Cu toate acestea, conducerea secvențială, comparativ cu alte metode de control, nu poate fi adaptată, cu ușurință, la o structură de conducere care să acționeze în sensul rejectării perturbațiilor.

În cazul aplicării conducerii cu **Algoritm PID_E**, se obțin performanțe optime ale răspunsului, saturația valorii de comandă conducând la o performanță apropiată de cea a conducerii cu PID convențional. În ceea ce privește valorile mărimii de comandă, analiza efectuată relevă repetabilitatea mărimilor de proces, cu variație sub 0,5%. Această variație este compensată, astfel încât să nu afecteze semnificativ valoarea de ieșire, respectiv valoarea de poziționare a produsului.

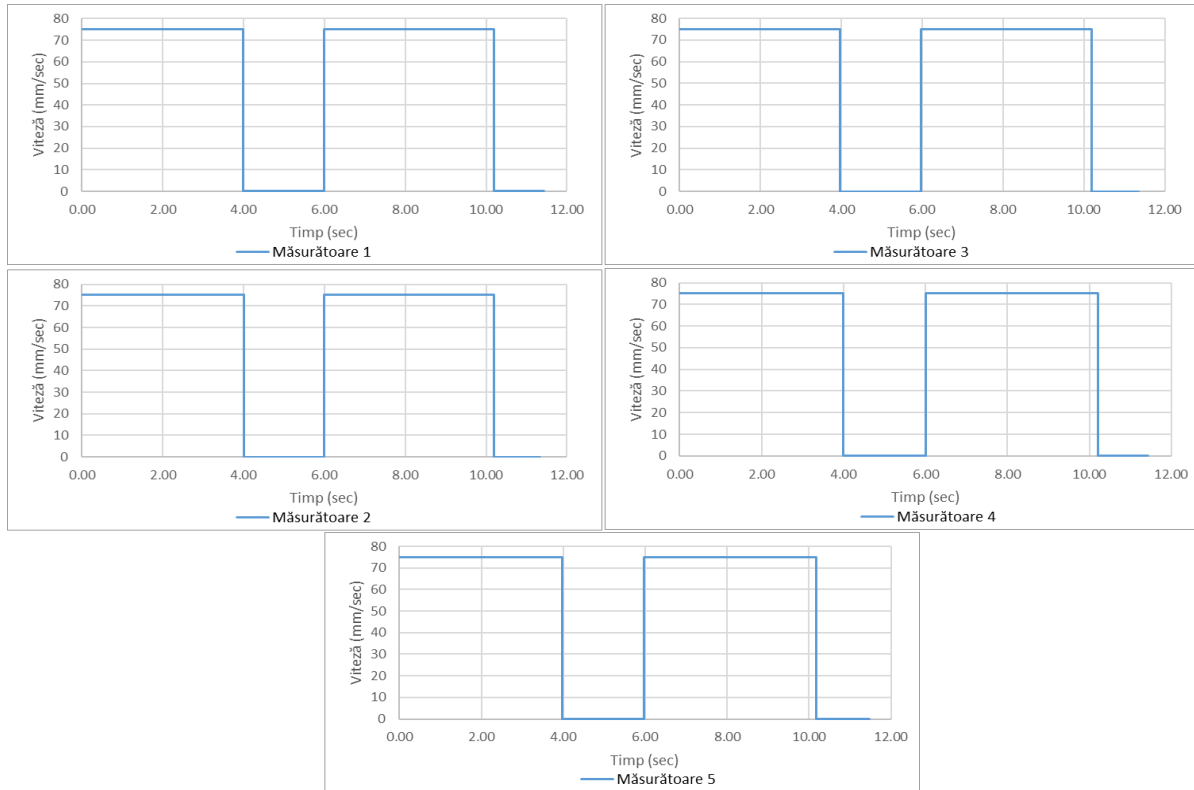


Figura 52. Monitorizarea comenzii pentru conducerea cu Algoritm PID_E

3.5. Rezultate și contribuții științifice

În acest capitol am detaliat proiectarea și implementarea unei structuri de conducerea a operațiilor de transport și poziționare de precizie a pieselor în postul de lucru, pentru fiecare din stațiile IFSM. Abordarea a considerat prezența perturbațiilor aditive pe comandă și pe mărimea de ieșire din proces, respectiv eroarea de poziționare măsurată în raport cu o referință prestabilită. Într-o primă etapă, prin utilizarea unei aplicații specializate a software-ului Matlab, PID Tuner_Plant Identification, s-a identificat modelul matematic al procesului, respectiv funcția de transfer. Prin simulări repetate ale modelului în Simulink, corespunzător structurii de conducere cu PID, în care se consideră acțiunea perturbațiilor aditive pe intrarea și pe ieșirea procesului, s-au evaluat performanțele structurii de conducere, pentru valori ale parametrilor controlerului, determinați cu PID_Tuner.

Astfel, s-au realizat obiectivele propuse: **OB.3.1.** Modelarea procesului și a perturbațiilor la nivelul unei stații de lucru; **OB.3.2.** Implementarea structurii de conducere pentru realizarea operației de transport într-o stație a IFMS, cu poziționare precisă în punctul de lucru și compensarea perturbațiilor, prin aplicarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0;

În proiectarea controlului sistemelor pentru fabricația flexibilă, se urmărește ca produsele să ajungă în locații cheie, în intervale predefinite. Pentru controlul vitezei de transport a conveiorului, s-a optat pentru o structură de conducere cu controller PID_E. În literatura de

specialitate, majoritatea controlerelor PID_E lucrează prin declanșării discrete, asociate atingerii unor valori de prag ale erorii. Aceste valori sunt determinate prin măsurări repetate, a intervale de timp eșantionate. Din aceasta abordare, rezultă că această metodă nu este general adaptabilă sistemelor de fabricație, senzorii fiind plasați în câteva locații cheie.

În urma cercetărilor s-a propus o îmbunătățire a algoritmului de declanșare, respectiv modificarea evenimentului asociat ultimei declanșări, prin raportare la eroarea de referință și monitorizări ale pozițiilor succesive, accesibile prin măsurătorilor. Această abordare rezolvă problema generată de evaluarea erorii de poziție numai în puncte cheie, pentru acele sisteme de transport în care, poziția nu poate fi măsurată eșantionat. În astfel de cazuri, eroarea de poziționare nu va fi determinată ca variabilă continuă în timp, deoarece poziția produsului este asociată doar unor poziții de referință. Prin evaluarea rezultatelor obținute, se constată că, prin utilizarea algoritmului PID_E se obțin performanțe similare cu cele ale controlerului PID convențional, dacă valoarea de comandă aparține unui interval predefinit. Mai mult, saturația valorii de comandă contribuie la stabilizarea controlerului PID_E. Astfel a fost atins obiectivul **OB.3.3**. Evaluarea rezultatelor cercetărilor prin implementarea unei structuri de conducere cu controler PID_E.

Îmbunătățirea conducerii bazate pe algoritmi declanșați de evenimente poate fi realizată prin aplicarea conceptului *Digital twin*, bazată pe utilizarea unui model digital al procesului condus. Rezultate ale simulării modelului digital, vor fi poziționate în interfață informațională, cu conducerea în timp real a procesului. Mărimea de comandă va fi livrată prin implementarea unui control cu *Digital twin*, care se bazează pe compensarea erorii dintre modelul digital și dinamic al stării procesului real, furnizată prin măsurători ale mărimilor din proces. Aceasta reprezintă un domeniu de cercetare emergent în controlul bazat pe evenimente și servește ca referință pentru cercetările ulterioare. În urma rezultatelor obținute, se pot face comparații suplimentare pentru dezvoltarea unui model digital de precizie și integrarea acestuia în bucla de control.

În această secțiune au fost atinse obiectivele specifice **obiectivului general OB.3**, referitor la conducerea operațiilor de transport și de poziționare precisă a pieselor în punctul de lucru, pentru fiecare din stațiile IFMS, cu integrarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0. Conducerea cu algoritm PID_E reprezintă o contribuție științifică semnificativă, pe care o propunem în zona conducerii proceselor de fabricație, în care monitorizarea unor mărimi de proces este condiționată de numărul și tipul senzorilor instalați în stații.

Sistemul integrat pentru fabricația flexibilă propus, are consistența unui CPS conectat la concepte și tehnologii specifice Industriilor 4.0 și 5.0. Analizând rezultatele cercetărilor, la acest moment al raportării, se pot evidenția concepte care au reprezentat etape importante progresul cercetărilor, respectiv în concepția, modelarea și implementarea structurii hardware și de conducere: • *CPS* - implementarea unui sistem integrat pentru fabricația flexibilă cu fluxuri paralele de producție, complet automatizate, echipat cu tehnologii de comunicare în structură ierarhică, care îl situează în clasa CPS; • *Robustețea procesului* - structura de conducere a IFSM conferă procesului atributul de robustețe. Procesul își conservă performanțele în condițiile acțiunii exogenului perturbator, datorită structurii de conducere cu rejectarea perturbațiilor; • *Sustenabilitatea producției* - structură de lucru cu comutare pe fluxuri alternative, în caz de avarie a fluxului curent; • *Sustenabilitatea mediului* - proiectarea unui sistem sustenabil orientat pe fabricație totală subordonată unui ciclu operațional complet de producție/recuperare/reutilizare de componente; • *Educație 5.0* -

modelarea avansată a sistemului integrat pentru fabricația flexibilă: modelarea cu RPT a subsistemelor și proceselor interconectate; modelarea cu RPS a controlului sincronizat a taskurilor; modelarea cu instrumente specializate de tip RPS a sincronizărilor de taskuri prin achiziții de semnale din proces.

Planificarea optimală a fabricației flexibile cu fluxuri paralele

-
- 4.1. Proiectarea algoritmului de planificare optimală a fabricației flexibile cu două fluxuri paralele
 - 4.1.1. Analiza fabricației în flux pe o stație a FFM
 - 4.1.2. Analiza fabricației paralele pe fluxurile FFM și FMC
 - 4.2. Algoritm pentru planificarea optimală a fabricației paralele, pe fluxurile FFM și FMC
 - 4.3. Rezultate și contribuții științifice
-

Problema planificării optimală este consecința firească a abordării problemei generale de planificare a distribuției de volume de producție, pentru fabricația cu fluxuri paralele. În general, prin planificarea optimală a fabricației pe fluxuri multiple, se determină distribuția volumelor de producție pe subsistemele paralele, dar și utilizarea echilibrată a resurselor. Astfel se evită apariția blocajelor, și se maximizează eficiența și performanțele producției, ceea ce, în abordări ale Industriilor 4.0 și 5.0, corespunde unui nivel ridicat de reziliență și robustețe a procesului industrial.

Sistemul integrat pentru fabricația flexibilă particularizează problematica generală a planificării deoarece, structural și funcțional este compus din două sisteme de producție independente. Aceste subsisteme pot lucra paralel, și uneori complementar sau colaborativ, pentru derularea unor sarcini de producție. În cercetările din această teză, s-a abordat aspectul fabricației paralele, în care cele doua subsisteme lucrează independent.

Problematica planificării optimale a fabricației este corelată cu structura hardware a ISFM. Fabricația pe linie, poate fi fabricație în flux, în care produsul este supus la operații succesive, pe stațiile interconectate liniar, sau se poate adapta la fabricația flexibilă, în care operațiile se desfășoară parțial pe fluxul stațiilor interconectate, dar cu transport înapoi al produsului dintr-o anumită locație, pentru a se relua o secvență de operații. Astfel, pe același sistem de producție, se pot executa produse cu mai multe tipologii, derivate dintr-un produs de bază. În abordarea propusă în teza, prin fabricația în flux se assemblează produse Tip 2, iar prin fabricația flexibilă se obțin produse multi-strat Tip 1.

În acest capitol se propune un algoritm de planificare optimală a sarcinilor, pentru cele două fluxuri de producție ale ISFM. O sarcină de producție, ridică problema planificării optimale, dacă există o comandă/cerere hibridă, produse Tip 1 și Tip 2, cu termen de livrare impus, pentru care distribuția volumului Tip 1 pe celula flexibilă, și a volumului Tip 2 pe linie, să nu respecte restricțiile impuse, respectiv durata de execuție, termenul de livrare și utilizarea echilibrată a resurselor de producție.

Într-o abordare generală, ISFM este compus din stații de lucru, interconectate sau independente, rezultând două subsisteme de producție:

- ✓ linie pentru fabricația flexibilă în flux (FFM), cu stații de lucru interconectate succesiv;

- ✓ celulă pentru fabricația flexibilă (FMC) deservită de un manipulator robotic și echipată cu propriile magazii de componente, care este asimilată unui sistem independent de producție.

În proiectarea algoritmului de planificare optimală a fabricației, s-au considerat următoarele ipoteze:

- Ip.0.1.* produsul Tip 1 poate fi executat pe ambele sisteme de fabricație: FFM, FMC;
- Ip.0.2.* produsul Tip 2 este executat exclusiv pe FFM;
- Ip.0.3.* operațiile de fabricație din stațiile FFM sunt sincronizate, prin cadența unică a operațiilor de transport pe conveioare;
- Ip.0.4.* FMC este asimilată cu o stație de lucru, astfel încât operațiile unui ciclu de fabricație, sunt independente de operațiile de pe FFM;
- Ip.0.5.* distribuția sarcinilor de fabricație pe FFM și FMC, va considera restricția ca pe cele două sisteme să se execute sarcini paralele de producție, cu durate minime și aproximativ egale;
- Ip.0.6.* distribuția sarcinilor pe FFM și FMC, va considera restricția ca pe cele două sisteme, să se execute sarcini de producție în cicluri de lucru aproximativ egale;
- Ip.0.7.* fabricația pe FMC nu introduce timpi de așteptare;
- Ip.0.8.* fabricația pe FFM poate fi una hibridă, relativ la tipologiile produselor lansate simultan în execuție, într-un ciclu de producție;
- Ip.0.9.* o comandă de produse Tip 1 și Tip 2, se echivalează cu sarcina de producție a volumelor v_1 și v_2 , care va ridica problema planificării optimale. Fabricația v_2 este sarcina alocată exclusiv pe FFM. Fabricația v_1 , impune distribuția inegală pe FFM și FMC, de un algoritm de planificare optimală. În final, fabricația pe ISFM va trebui să respecte restricțiile de timp total de execuție și de utilizare echilibrată a resurselor;
- Ip.0.10.* planificarea optimală, respectiv distribuția sarcinilor de lucru pe FFM și FMC, va determina cicluri de lucru comparabil egale și conforme cu restricțiile impuse prin comandă, colectată prin Aplicația Client-Server;
- Ip.0.11.* sarcina de producție se consideră încheiată dacă toate produsele au trecut testul de calitate;
- Ip.0.12.* fabricația produsului Tip 1 pe FFM, presupune execuția unei secvențe de operații succesive, urmată de transport cu SRTS și re poziționarea produsului într-o stație localizată în urma stației curente, pentru a se repeta o secvență de operații;
- Ip.0.13.* fabricația simultană pe FFM a produselor cu tipologie 1 și 2, precum și colectarea în postul de calitate a produselor de pe fluxurile FFM și FMC, vor respecta sincronizările de task-uri, furnizate de modelele RPS (capitolul2);

În concluzie, fabricația FFM presupune reluarea unor secvențe de asamblare, respectiv operații de transport, în sensul invers direcției de deplasare în flux (sensul de transport pe conveioare) pe ISFM, așteptare și reinserare în FFM. Această reinserare în flux determină întârzieri ale produselor aflate în curs de asamblare pe linie, în stațiile poziționate înaintea nodului de întoarcere. Mai mult, în stația de control al calității, se colectează produsele

fabricate pe FFM și FMC, ceea ce implică sincronizări ale operațiilor de manipulare și transport, pentru coordonarea accesului.

4.1. Proiectarea algoritmului de planificare optimală a fabricației flexibile cu două fluxuri paralele

În acord cu cele prezentate și considerând o cerere de producție hibridă, în sensul tipologiilor, se ridică problema proiectării unui algoritm de planificare optimală a fabricației simultane pe FFM și FMC, bazat pe respectarea sincronizărilor de task-uri, distribuția volumelor de producției pe fluxuri, reducerea întârzierilor, minimizarea timpului total de producție și echilibrarea utilizării resurselor ISFM.

4.1.1. Analiza fabricației în flux pe o stație a FFM. Determinarea mărimilor caracteristice

În cadrul unui sistem pentru fabricația flexibilă se consideră modelul general structural și funcțional al unei stații k , cu $k \in [1, N]$, și N numărul de stații ale liniei de asamblare (Figura 53). Relativ la un volum de produse cu aceeași tipologie, considerăm un produs p , unde $p \in [1, P]$, P reprezintă întregul volum de produse.

Se propun următoarele notații:

- $T_{transIn_k}$ durata transportului de la intrarea în zona de asamblare până la sosirea în punctul de asamblare;
- $T_{transOut_k}$ durata transportului de la punctul de asamblare până la ieșirea din zona de lucru a stației k ;
- $T_{assembly_k}$ durata de asamblare a produsului în stația k .

La sosirea în stația k , un produs poate proveni fie de la stația anterioară de pe fluxul principal, fie din bucla de retur, dacă produsul repetă operația de asamblare din stația k . În mod similar, produsul care părăsește stația k poate fi direcționat către următoarea stație de pe fluxul principal sau se poate întoarce pentru a repeta operația dintr-o stație anterioară.

Pornind de la suma duratelor operațiilor de asamblare și transport pentru o stație k , se definește $T_{prodmax}$ ca fiind cea mai mare dintre cele N durate, corespunzătoare duratele secvențelor consumate în fluxul de producție

$$T_{prodmax} = \max_{k=1, N} (T_{transIn_k} + T_{assembly_k} + T_{transOut_k}). \quad (4.1)$$

$T_{prodmax}$ imprimă cadența de lucru în flux, implicit determină un efect de *bottleneck* în procesul de fabricație, deoarece toate celelalte stații intră în așteptare. Procesul de așteptare se încheie atunci când în stația cu cel mai mare timp de producție se încheie execuția operațiilor.

Se notează cu T_{wait_k} timpul de așteptare aferent stației k . El este generat de acțiunea generală de sincronizare a momentului START al fiecărei operații din stație, cu momentele de START ale operațiilor din stațiile cu care stația k este conectată funcțional. T_{wait_k} se poate determina prin

$$T_{wait_k} = T_{prodmax} - (T_{transIn_k} + T_{assembly_k} + T_{transOut_k}). \quad (4.2)$$

Astfel, pentru o stație k , timpul de producție T_{prod_k} , poate fi definit prin

$$T_{prod_k} = T_{transIn_k} + T_{assembly_k} + T_{transOut_k} + T_{wait_k} \cdot \quad (4.3)$$

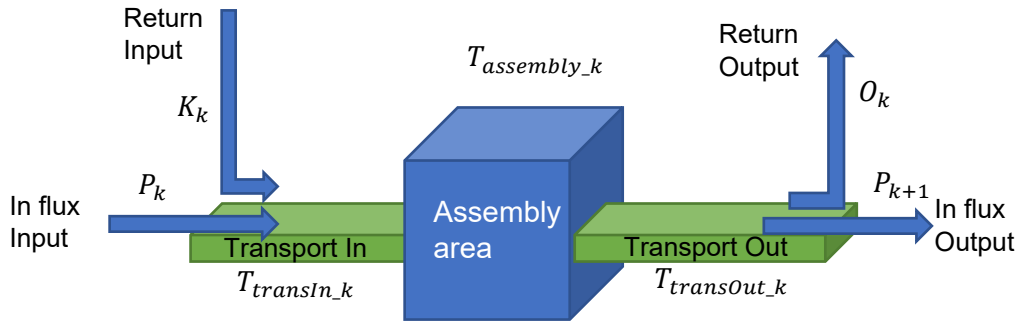


Figura 53. Succesiunea operațiilor de transport și asamblare din stația k

Deoarece toate stațiile sunt sincronizate cu stația care are perioada maximă de procesare, se propune uniformizarea semnificației timpului de producție din stația k ca fiind

$$T_{prod_k} = T_{prod \max} \cdot \quad (4.4)$$

Pe baza semnificației timpului de producție T_{prod_k} și a succesiunii operațiilor, se va defini $T_{cycle_p^N}$ ca fiind timpul necesar pentru asamblarea completă a unui produs, respectiv durata unui ciclu de producție pentru un produs fabricat FFM, cu relația:

$$T_{cycle_p^N} = \sum_{k=1}^N \sigma_{k,p} T_{prod_k} + \gamma_p T_{transport} + \sum_{k=1}^N T_{stop_{k,p}}, \quad (4.5)$$

unde:

$\sigma_{k,p}$ reprezintă numărul de treceri sau numărul de operații recurente pentru asamblarea produsului p în stația k ;

γ_p reprezintă numărul de acțiuni de retur ale produsului p ,

$$\gamma_p = \max(\sigma_{k,p}) - 1 \quad (4.6)$$

$T_{transport}$ este durata de transport pe bucla de întoarcere a produsului p ;

Dacă se consideră duratele de așteptare din stația k , $T_{stop_{k,p}}$ timpul de așteptare necesar introducerii unui produs în stația următoare, rezultă:

$$T_{stop_{k,p}} = \theta_{k+1,p} \cdot T_{prod_{k+1}}, \quad (4.7)$$

unde $\theta_{k+1,p}$ este numărul de produse introduse în stația poziționată după k , în timp ce produsul p este în așteptare în stația k . Produsul p așteaptă eliberarea stației $k+1$, așteptare condiționată de valoarea lui $\theta_{k+1,p}$.

4.1.2. Analiza fabricației paralele pe fluxurile FFM și FMC

Pentru reprezentarea unui proces general de fabricație flexibilă (Figura 54) s-a considerat fabricația unui volum de produse Tip 1, ca fiind realizată prin sarcini distribuite cu execuție paralelă, pe FFM și FMC. Astfel se va determina distribuția optimă, în sensul planificării optime a fabricației simultane, pe fluxurile paralele.

Se propun următoarele ipoteze:

- Ip.1.1. p reprezintă volumul de produse Tip 1, care constituie comanda de producție, preluată de la client;
- Ip.1.2. m , $m \in [1, P]$ este produs Tip 1 care va fi transferat prin operații de transport înapoi în acord cu tehnologia de execuție;
- Ip.1.3. stația $(i + i_{Back})$, unde $i \in [1, N]$ este stația până la care produsul m are traseul de deplasare, în sensul de deplasare al conveioarelor, și direcție paralelă cu acestea;
- Ip.1.4. i_{Back} reprezintă numărul de stații pe care produsul m le parcurge prin deplasare în sensul invers celui de deplasare al conveioarelor;
- Ip.1.5. „deplasarea înapoi” a unui produs, este o operație de transport pe care o efectuează sistemul robotic de transport SCARA (SRTS), cu care a fost echipată linia FFM, pentru reluarea unei secvențe de operații.

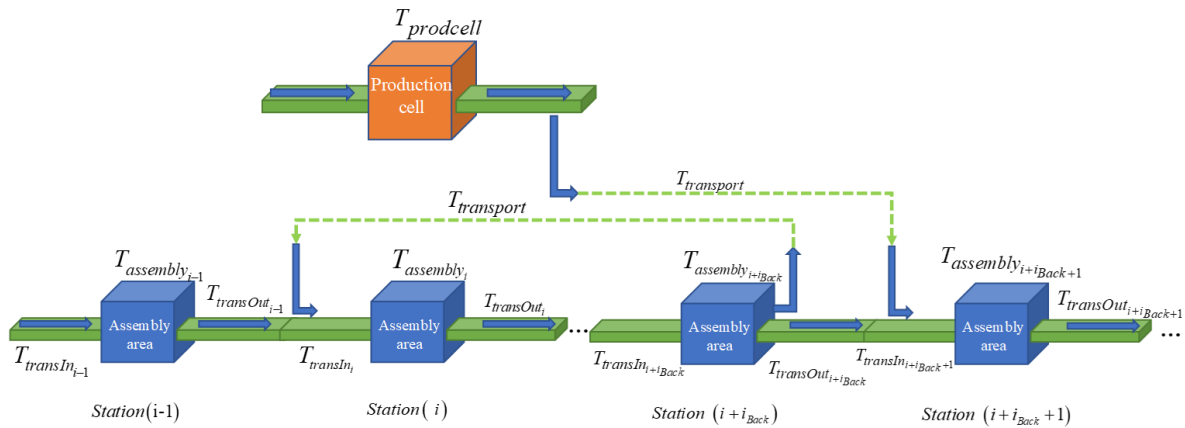


Figura 54. Succesiunea operațiilor de transport și asamblare, pentru fabricația flexibilă pe fluxurile paralele, FFM și FMC

Produsul m va introduce două tipuri de timpi de așteptare: timp de așteptare care afectează stațiile de lucru, și timp de așteptare care afectează stațiile și produsele din stațiile anterioare, după cum urmează:

- $T_{halt_{i+i_{Back}+1, m}}$ este primul timp de așteptare, asociat stației $i + i_{Back} + 1$.

Acesta reprezintă intervalul de timp în care stația $i + i_{Back} + 1$ așteaptă sosirea unui produs:

$$T_{halt_{i+i_{Back}+1, m}} = \delta_{i+i_{Back}+1, m} \cdot T_{prod_{i+i_{Back}}}, \quad (4.8)$$

unde $\delta_{i+i_{Back}+1, m}$ reprezintă numărul de produse care sunt transportate „înapoi” pe fluxul de producție, din stația $i + i_{Back}$, în stația i . Acest interval de așteptare

are loc imediat după ce produsul m părăsește stația $i + i_{Back}$ și nu are nicio influență asupra timpului de așteptare al produsului $m + 1$;

- $T_{stop_{i-1,m}}$ este un timp de așteptare determinat de introducerea produsului m în stația i .

Această operație va fi sincronizată cu oprirea produsului din stația $i - 1$, în sensul introducerii unui timp de așteptare pentru acesta, $T_{stop_{i-1,m}}$. Durata de stop (*wait*) a produsului în stația $i - 1$ este proporțională cu numărul de produse care vor suporta întoarceri/reinserări în stația i

$$T_{stop_{i-1,m}} = \theta_{i,m} T_{prod_i} \quad (4.9)$$

În mod similar se propun determinarea timpului de producție în FMC, în acord cu următoarele notații și ipoteze de lucru:

- ✓ $T_{prodcell}$ reprezintă timpul de fabricație al unui produs Tip 1, pentru FMC. Pentru FMC se propune o abordare echivalentă cu o stație de lucru, pentru care se vor aplica considerațiile propuse anterior. Astfel $T_{prodcell}$ este definit ca timpul de producție în FMC, care este considerat ca fiind un multiplu al timpului maxim de producție pe stație, din FFM. Abordarea este justificată prin ipoteza inițială (**Ip.0.4**), în care se consideră că întregul sistem integrat pentru fabricația flexibilă are operații sincronizate la nivel de stații, în sensul sincronizării operațiilor de START pentru fiecare stație :

$$T_{prodcell} = \beta T_{prod max}, \beta \in N^*, \beta \geq 1 \quad (4.10)$$

După finalizarea procesului de asamblare a unui produs r , $r \in [1, P]$ pe sistemul FMC, produsul este transferat la stația N pentru efectuarea controlului de calitate și depozitării. Inserarea produsului r , finalizat în FMC, în stația N de pe FFM, implică o operație de transport cu SRTS și plasarea lui în locația dedicată. Operația se va sincroniza cu oprirea produsului aflat în stația anterioară, $N - 1$, aflată pe FFM. Astfel:

- $T_{stop_{N-1,m}}$ reprezintă timpul de așteptare din stația $N - 1$, indus de introducerea produsului r în stația N și de finalizarea operațiilor la care este supus r , în stație. Produsul r , asamblat complet în FMC, este supus operațiilor de transport, manipulare cu SRTS și testarea calității în stația N :

$$T_{stop_{N-1,m}} = T_{prod_N}; \quad (4.11)$$

- $T_{transport}$ reprezintă durata oricărei secvențe de transport pe cele două fluxuri, respectiv durata de transport cu SRTS.

Timpul de așteptare este o durată ciclică, cu o perioadă de repetabilitate egală cu $T_{prodcell}$ pentru un timp de transport $2 \cdot T_{transport} < T_{prodcell}$. Rezultă că timpul de transport cu SRTS, nu influențează periodicitatea introducerii timpului de așteptare după inițializarea ISFM. Fabricația în FMC începe după preluarea produsului de către SRTS.

Astfel, pentru simplificare se propune definirea timpului de transport ca:

$$T_{transport} = \lambda T_{prod max}, \lambda \in N, \lambda \geq 1 \quad (4.12)$$

Aproximarea se aplică pentru orice secvență de transport pe FFM, sau între FMC și FFM, unde coeficientul λ reprezintă valoarea de echivalarea a unei operații de transport cu durata maximă de producție, pe o stație. Programarea operațiilor de transport cu SRTS se face în funcție de durata unei fabricații în stație. Se propune acceptarea uniformizării acestei durate, $T_{prodmax}$, astfel încât timpul total de transport, $T_{transport}$, să fie un multiplu al timpului maxim de producție în stații.

Aplicând aceste considerații și relațiile (4.4), (4.10) și (4.12), se poate defini timpul de ciclu de producție pe FMC:

$$T_{CycleCell} = T_{prodcell} + T_{transport} + T_{prodN}, \quad (4.13)$$

de unde rezultă:

$$T_{CycleCell} = (\beta + \lambda + 1) T_{prodmax}. \quad (4.14)$$

4.2. Algoritm pentru planificarea optimală a fabricației paralele, pe fluxurile FFM și FMC

Demersul științific al determinării unui algoritm pentru planificare optimală, propune o repartizare diferențiată a volumelor de fabricație pe FFM și FMC, cu respectarea restricțiilor privind minimizarea duratelor de producție, încărcarea echilibrată a celor două sisteme de producție, minimizarea timpilor de așteptare, respectarea sincronizărilor pentru evitarea coliziunilor, etc.

În conformitate cu ipotezele inițiale (respectiv **Ip.0.1.** produsul Tip 1 poate fi executat pe FFM și FMC; **Ip.0.2.** produsul Tip 2 este executat exclusiv pe FFM), planificarea volumelor de producție presupune distribuția optimă, în funcție de tipologia produselor lansate în execuție.

Algoritmul de planificare propune minimizarea timpilor de așteptare pe ambele fluxuri de producție, implicit minimizarea timpului total de producție, atunci când pe fluxurile paralele se planifică o fabricație mixtă, respectiv produse Tip 1 (T_1) și Tip 2 (T_2).

Astfel, pentru produsul T_1 , relațiile (4.5; 4.6; 4.12) se actualizează cu următoarele variabile :

$$T_{cycle_p}^N = \sum_{k=1}^N \sigma_{k,p} T_{prod_k} + \gamma_p T_{transport} + \sum_{k=1}^N T_{stop_{k,p}}, \quad (4.15)$$

$\sigma_{k,p} = \sigma_{k,T_1}$ - unde σ_{k,T_1} reprezintă numărul de treceri prin stația k de pe FFM la asamblarea produsului Tip 1; pentru anumite valori ale lui k , se identifică valorile particulare $\sigma_{k,T_1} = 1$ pentru $k = \overline{1, l} \cap \overline{l + l_{Back}, N}$ și $\sigma_{k,T_1} = 2$ pentru $k = \overline{l, l + l_{Back}}$;

$\gamma_p = \gamma_{T_1}$ - unde γ_{T_1} reprezintă numărul de returnări pe FFM, ale produsului de Tip 1, în vederea repetării operațiilor. Pentru produsul Tip 1 se consideră $\gamma_{T_1} = 1$;

$T_{stop_{k,T_1}} = \theta_{k+1,T_1} T_{prod_{k+1}}$ - pentru $p = T_1$ în ecuația (4.6);

$T_{transport} = T_{prodmax}$ - pentru $\lambda = 1$ în ecuația (4.12).

Obs: din simularea modelelor RPS și din observațiile experimentale, s-a constatat că timpul necesar pentru derularea întregului proces de asamblare, este mai mare decât timpul de transport cu SRTS.

Pe baza acestei ipoteze, coeficientul de transport λ a fost estimat la valoarea 1 (unu).

Considerând relațiile (4.5) și (4.6), timpul de ciclu pentru producția de T_1 , $T_{cycle_{T_1}^N}$, pe sistemul FFM devine

$$T_{cycle_{T_1}^N} = \sum_{k=1}^{i+i_{Back}} T_{prod_k} + \sum_{k=i}^N T_{prod_k} + T_{transport} + \sum_{k=1}^N \theta_{k+1,T_1} T_{prod_{k+1}} \cdot \quad (4.16)$$

Corelând relația (4.4) cu (4.16), rezultă

$$T_{cycle_{T_1}^N} = (N + i_{Back}) T_{prod_{max}} + T_{prod_{max}} + \sum_{k=1}^N \theta_{k+1,T_1} T_{prod_{k+1}} \cdot \quad (4.17)$$

În mod similar, pentru produsele T_2 , pe baza parametrilor $\sigma_{k,T_2} = 1$ pentru $k = \overline{1, N}$ și $\gamma_{T_2} = 0$ se obține

$$T_{cycle_{T_2}^N} = \sum_{k=1}^N T_{prod_k} + \sum_{k=1}^N \theta_{k+1,T_2} T_{prod_{k+1}} \cdot \quad (4.18)$$

Corelând relația (4.4) cu (4.18), rezultă

$$T_{cycle_{T_2}^N} = N T_{prod_{max}} + \sum_{k=1}^N \theta_{k+1,T_2} T_{prod_{k+1}} \cdot \quad (4.19)$$

Pentru procesul de producție pe ISFM, se definesc variabilele v_1 și v_2 ca fiind volumul de produse T_1 și T_2 , preluate de la client prin comanda de producție.

Reconsiderând ipotezele **Ip.0.1.**, **Ip.0.2.** (produsul Tip 1 poate fi executat pe ambele sisteme de fabricație, FFM și FMC; produsul Tip 2 este executat exclusiv pe FFM), rezultă că variabila v_1 va trebui partajată în două volume. Se notează cu n volumul de produse T_1 care se va executa pe FFM.

Având în vedere volumul de producție v_1 introdus în fluxul FFM, timpul total de așteptare $T_{TotalWait}$ se calculează astfel

$$T_{TotalWait} = \sum_{T_2=1}^{v_2} \sum_{k=1}^N \theta_{k+1,T_2} T_{prod_{k+1}} + \sum_{T_1=1}^n \sum_{k=1}^N \theta_{k+1,T_1} T_{prod_{k+1}} \cdot \quad (4.20)$$

În elaborarea algoritmului se vor considera următoarele obiective, care stau la baza planificării optime a fabricației:

- OB.4.1.1.** Minimizarea timpului de producție pe cele două fluxuri de fabricație: FFM, FMC;
- OB.4.1.2.** Minimizarea timpului de producție pe FFM;
- OB.4.1.3.** Minimizarea timpilor de așteptare introduși pe fluxul FFM, în momentul reinserării în stație a produsului transportat înapoi, cu STRS;

OB.4.1.4. Echilibrare sarcinilor pe cele două sisteme, FFM și FMC, în sensul echilibrării timpului de producție, implicit a utilizării resurselor de producție, pentru fabricația paralelă hibridă.

Pentru a minimiza timpul de producție pe fluxul FFM, este necesar ca timpul total de așteptare să fie minim.

Timpul total de așteptare pentru o planificare simplă a producției, poate fi exprimat prin

$$T_{TotalWait} = v_1 T_{prod\ max} |_{unoptimized} \cdot \quad (4.21)$$

În calcul lui $T_{TotalWait}$ s-a considerat că fabricația volumului de produse de T_1 , introduce pentru fiecare produs, un timp de așteptare egal cu timpul de producție al stației în care este introdus. Plecând de la relația (4.7) și modelele cu RPS ale sistemului de fabricație, se poate concluziona că, atunci când produsele de T_1 sunt preluate de SRTS de pe FFM și returnate cu STRS pentru noi operații, produsele din FMC vor fi introduse pe FFM, fără a introduce timpi de așteptare. Astfel, timpul total de așteptare introdus de produsele din FMC pe FFM va fi zero (**OB.4.1.4**).

Considerând acest raționament, timpul total de așteptare poate fi definit ca

$$T_{TotalWait} = (v_1 - \eta) T_{prod\ max} |_{optimized} \cdot \quad (4.22)$$

Pentru FFM se definește $T_{prodFFM}$ ca fiind timpul total de producție simultană a volumelor v_2 - corespunzător produselor T_2 , și n - corespunzător produselor T_1 . Luând în considerare, pentru un produs, timpul de producție pentru fiecare stație, timpii de așteptare înainte de procesare, timpul necesar pentru transportul între stații, și considerând ipoteza că în fiecare stație există permanent un produs în curs de procesare, $T_{prodFFM}$ poate fi exprimată prin:

$$\begin{aligned} T_{prodFFM} = & N T_{prod\ max} + \frac{1}{N} \sum_{T_2=1}^{v_2-1} N T_{prod\ max} + \sum_{T_2=1}^{v_2} \sum_{k=1}^N \theta_{k+1, T_2} T_{prod_{k+1}} + \sum_{T_1=1}^{\eta} N T_{prod\ max} \\ & + \frac{\sum_{T_1=1}^{\eta} (N + i_{Back}) T_{prod\ max}}{N + i_{Back}} + \sum_{T_1=1}^{\eta} \sum_{k=1}^N \theta_{k+1, T_1} T_{prod_{k+1}} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Pornind de la ipoteza **Ip.0.7**. (fabricația pe FMC nu introduce timpi de așteptare pe FFM), coroborat cu ipoteza ca durata operațiunilor de transport și asamblare este constantă, se propune un algoritm de planificare optimală, în acord cu **OB.4.4.1** (minimizarea duratei de producție presupune minimizarea timpului total de așteptare), **OB.4.1.4** (determinarea volumelor de producție astfel încât, cele două sisteme, FFM și FMC, să aibă încărcări echilibrate în timp).

În acest sens, se definește o funcție de optimizare:

$$J_{IFMS} = \min(T_{TotalWait}), \quad (4.24)$$

cu respectarea restricției de distribuire echilibrate a volumelor de producție pe cele două fluxuri paralele FFM și FMC. Aceasta restricție se exprima prin relația:

$$\sum_{r=1}^{v_1-\eta} T_{CycleCell} - T_{prodFFM} \approx 0. \quad (4.25)$$

Deoarece timpul de producție pe fluxul FMC nu include timpi de așteptare sau întreruperi, minimizarea timpilor de așteptare pe fluxul FFM și egalizarea timpilor de producție între cele două fluxuri de asamblare, reprezintă elementele esențiale pentru a realiza minimizarea timpului de producție pe ISFM.

Din relațiile (4.14), (4.23) și (4.25), se obține

$$\begin{aligned} & \sum_{r=1}^{v_1-\eta} (\beta + 2) T_{prod\ max} - [NT_{prod\ max} + 2\eta T_{prod\ max} + \sum_{T_2=1}^{v_2} \sum_{k=1}^N \theta_{k+1, T_2} T_{prod_{k+1}} \\ & + \sum_{T_1=1}^{\eta} \sum_{k=1}^N \theta_{k+1, T_1} T_{prod_{k+1}} + (v_2 - 1) T_{prod\ max}] = 0 \end{aligned} \quad (4.26)$$

Iar prin introducerea relației (4.22) se obține

$$\begin{aligned} & (v_1 - \eta)(\beta + 2) T_{prod\ max} - [NT_{prod\ max} - T_{prod\ max} \\ & + v_2 T_{prod\ max} + \eta T_{prod\ max} + v_1 T_{prod\ max}] = 0 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Prin reducerea termenilor relația (4.27) rezultă

$$v_1(\beta + 2) T_{prod\ max} - \eta(\beta + 3) T_{prod\ max} - v_2 T_{prod\ max} - NT_{prod\ max} + T_{prod\ max} = 0. \quad (4.28)$$

În final rezultă:

$$\eta = \frac{v_1(\beta + 1) - v_2 - N + 1}{\beta + 3}, \quad (4.29)$$

ce reprezintă volumul de produse de T_1 , pentru fabricația pe FFM.

Implementarea relației (4.22) presupune sincronizarea T_{sync} între producția pe FMC și producția pe FFM, cu c - factor de sincronizare. Astfel dacă transportul între cele două fluxuri paralele respectă constrângerile temporale, rezultă

$$T_{sync} = c T_{prod\ max}. \quad (4.30)$$

Această perioadă de sincronizare reprezintă durata necesară pentru ca produsul T_1 , de pe fluxul FMC, și cel de pe fluxul FFM, să ajungă în același timp la stația $i + i_{Back}$. Această se poate exprima prin

$$T_{sync} = (T_{prod\ cell} + T_{transport}) - T_{cycle_{T_1}}^{i+i_{Back}}. \quad (4.31)$$

Utilizând relațiile (4.5) și (4.29) în relația (4.31) se obține

$$c = \beta + 1 - (i + i_{Back} + \theta_{i, T_1}). \quad (4.32)$$

Prin analiza relației (4.32) rezultă trei cazuri:

$c < 0$	producția produsului T_1 pe fluxul FFM începe cu o perioadă de $ c \cdot T_{prod\ max}$ înainte de începerea producției pe fluxul FMC;
---------	---

$c = 0$	producția pe fluxurile FFM și FMC, începe simultan;
$c > 0$	producția produselor Tip 1 pe FFM începe cu o întârziere de $ c \cdot T_{prod\ max}$ față de momentul de start al producției pe FMC.

Pentru a verifica eficiența fabricației pe ISFM, se propun două scenarii, respectiv două secvențe repetitive ale fabricației mixte, furnizate de algoritmul de planificare optimă a producției. Fiecare secvență repetitivă conține un set de informații relativ la numărul de piese și tipul produsului (T_1 , T_2). Fabricația celor două volume de produse rezultă prin planificarea fabricației hibride pe sistemele paralele de producție, FFM și FMC:

➤ Scenariul 1

Pentru $c \leq 0$ algoritmul de planificare optimă furnizează următoarea strategie de fabricație pe cele două fluxuri paralele:

$$\begin{array}{ll}
 1 & \text{produs Tip 1 pe fluxul FFM} \\
 c & \text{produse Tip 2 pe fluxul FFM} \\
 1 & \text{produs Tip 1 pe fluxul FMC} \\
 \beta - 2 - c & \text{produse Tip 2 pe fluxul FFM}
 \end{array} \quad (4.33)$$

➤ Scenariul 2

Pentru $c > 0$ algoritmul de planificare optimă furnizează următoarea strategie de fabricație pe cele două fluxuri paralele:

$$\begin{array}{ll}
 1 & \text{produs Tip 1 pe fluxul FMC} \\
 c & \text{produse Tip 2 pe fluxul FFM} \\
 1 & \text{produs Tip 1 pe fluxul FFM} \\
 \beta - 2 - c & \text{produse Tip 2 pe fluxul FFM}
 \end{array} \quad (4.34)$$

4.3. Rezultate și contribuții științifice

În acest capitol cercetările au vizat îndeplinirea **OB.4. Planificarea optimă a fabricației hibride, pe o linie pentru fabricația flexibilă cu două fluxuri de producție paralele**. Astfel a fost elaborat un algoritm general pentru planificarea optimă a fabricației, care poate fi personalizat în funcție de structura hardware a sistemului de producție, cu fluxuri paralele.

O primă abordare în demersul de optimizare a planificării procesului de producție, a considerat analiza performanțelor fabricației, planificate după principiul distribuției egale a numărului de produse, pe fluxurile de producție. Astfel, într-o primă etapă s-a propus un algoritm de planificare a volumelor de producție, pentru un sistem cu două fluxuri de lucru paralele (**OB.4.1.**). O astfel de planificare, conduce la funcționarea ISFM cu posibile întârzieri cauzate de lipsa sincronizărilor taskurilor care se intersectează în anumite noduri.

S-a continuat cu rafinarea algoritmului, care a fost proiectat și implementat pentru ISFM, a cărui structura hardware constă dintr-o celulă flexibilă și o linie de producție cu stații interconectate, deservită de STRS. În urma analizei succesiunii operațiilor de fabricație, manipulare și transport pentru *două fluxuri de producție paralele sincronizate*, a fost propus algoritmul pentru planificarea optimă, a fabricației hibride, pe o linie cu două fluxuri paralele.

Aspectul de optimizare a vizat obiective specifice: **OB.4.1.1.** Minimizarea timpului de producție pe cele două fluxuri de fabricație: FFM și FMC; **OB.4.1.2.** Minimizarea timpului de producție pe FFM; **OB.4.1.3.** Minimizarea timpilor de așteptare introduși pe fluxul FFM, la reinserarea în stații a produselor transportate înapoi, cu STRS; **OB.4.1.4.** Echilibrarea sarcinilor pe cele două sisteme FFM și FMC, în sensul echilibrării încărcării în timp a sarcinilor de producție.

În această secțiune s-au atins obiectivele specifice, ale **obiectivului general OB.4.** Proiectarea unui algoritm de planificare optimală a fabricației hibride, pe o linie cu fluxuri de producție paralele. Algoritmul propus este subordonat restricțiilor de minimizare a timpului total de fabricație, și a timpilor de așteptare.

Algoritm pentru planificarea optimală, proiectat pentru un sistem hardware destinat fabricației flexibile cu fluxuri paralele și o structură mixtă a cererii de produse, reprezintă o contribuție semnificativă. Această abordare a planificării fabricației imprimă ISFM atribute specifice Industriei 4.0 și 5.0, respectiv *sustenabilitate* și *reziliență*: algoritmul propus asigură utilizarea echilibrată a resurselor sistemului de producție, respectiv echilibrarea încărcării resurselor hardware, în acord cu atributul de sustenabilitate. Fabricația flexibilă pe ISFM poate fi planificată prin distribuția optimală a volumelor de producție, sau dimpotrivă, pentru volume mici ale cererii, se poate comuta pe planificarea simplă, datorită atributului de reziliență.

Implementarea planificării optimale a fabricației flexibile pe fluxuri paralele, în abordare specifică conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0

- 5.1. Implementarea și testarea planificării optimale a fabricației flexibile cu două fluxuri paralele. Studiu de caz
 - 5.2. Aplicație Client-Server pentru planificarea optimală a fabricației paralele, în abordare specifică
 - 5.3. Rezultate și contribuții științifice
-

În industrie, optimizarea fabricației, în special pentru procese cu fluxuri paralele, rămâne o prioritate. Totuși accentul se pune pe proiectarea și implementarea structurilor hardware și de conducere avansate, cu grad ridicat de automatizare și robotizare, pentru care principul de creștere a eficienței economice să fie prima prioritate.

Prin aplicarea conceptelor specifice *Industriei 4.0*, s-au implementat structuri complet automatizate și robotizate, orientate pe maximizarea eficienței economice, deconectate de problemele de mediu, implicit de politicile de protecție a acestuia.

Conceptele specifice Industriei 5.0 propun o viziune complementară în raport cu abordarea strictă a automatizării și robotizării totale, propusă de revoluția 4.0. Industria 5.0 plasează factorul uman, respectiv operatorul și/sau clientul, în centrul procesului industrial, considerându-l factor cheie în procesul decizional. Astfel, conceptual sistemele de producție devin centrate pe *factorul uman*, și funcționează pe principiul *sustenabilității resurselor naturale*, dacă se consideră impactul asupra mediului înconjurător.

În acest capitol se propune o abordare specifică Industriei 5.0, prin introducerea interacțiunii directe *client – sistem integrat pentru fabricația flexibilă*, atât în structurile de conducere dar și în planificarea fabricației. De la intervenția în proces a operatorului uman, prin HMI-urile locale, ades opțională, s-a ajuns la sisteme care plasează în centrul de decizie și de colectare a datelor, factorul uman, în poziție de specialist, operator, sau client

Astfel, se propune o aplicație software Client-Server, găzduită de serverul *Cloud*, care permite preluarea cerințelor de producție, direct de la client. Acesta este un pas important în direcția unei producții personalizate, dar și de implementare a unui sistem centrat pe om, cu deschidere spre factorul uman de pretutindeni.

5.1. Implementarea și testarea planificării optimale a fabricației flexibile cu două fluxuri paralele. Studiu de caz

În cadrul sistemului de fabricație flexibilă, se presupune o comandă de producție compusă din 10 produse de tip 1 și 15 produse de tip 2. Dacă se consideră planificarea simplă a producției, se aplică o distribuție egală pe fluxuri, a produselor cu T_1 , astfel încât distribuția produselor pe fluxurile FFM și FMC devine: 5 produse Tip 1 sunt direcționate către fluxul FMC,

5 produse de tip 1 sunt direcționate către fluxul FFM, iar 15 produse de tip 2 sunt direcționate către fluxul FFM.

Particularizând cererea la caracteristicile sistemului integrat pentru fabricația flexibilă, se pot determina o serie de parametri:

- $v_1 = 10$ volumul total de produse Tip 1 colectat ca cerere client;
- $v_2 = 15$ volumul total de produse Tip 2 colectat ca cerere client;
- $N = 6$ numărul de stații componente ale IFMS;
- $\beta = 5$ coeficient de multiplicare a duratei fabricației pe fluxul FMC, în raport cu timpul maxim de producție pe fluxul FFM;

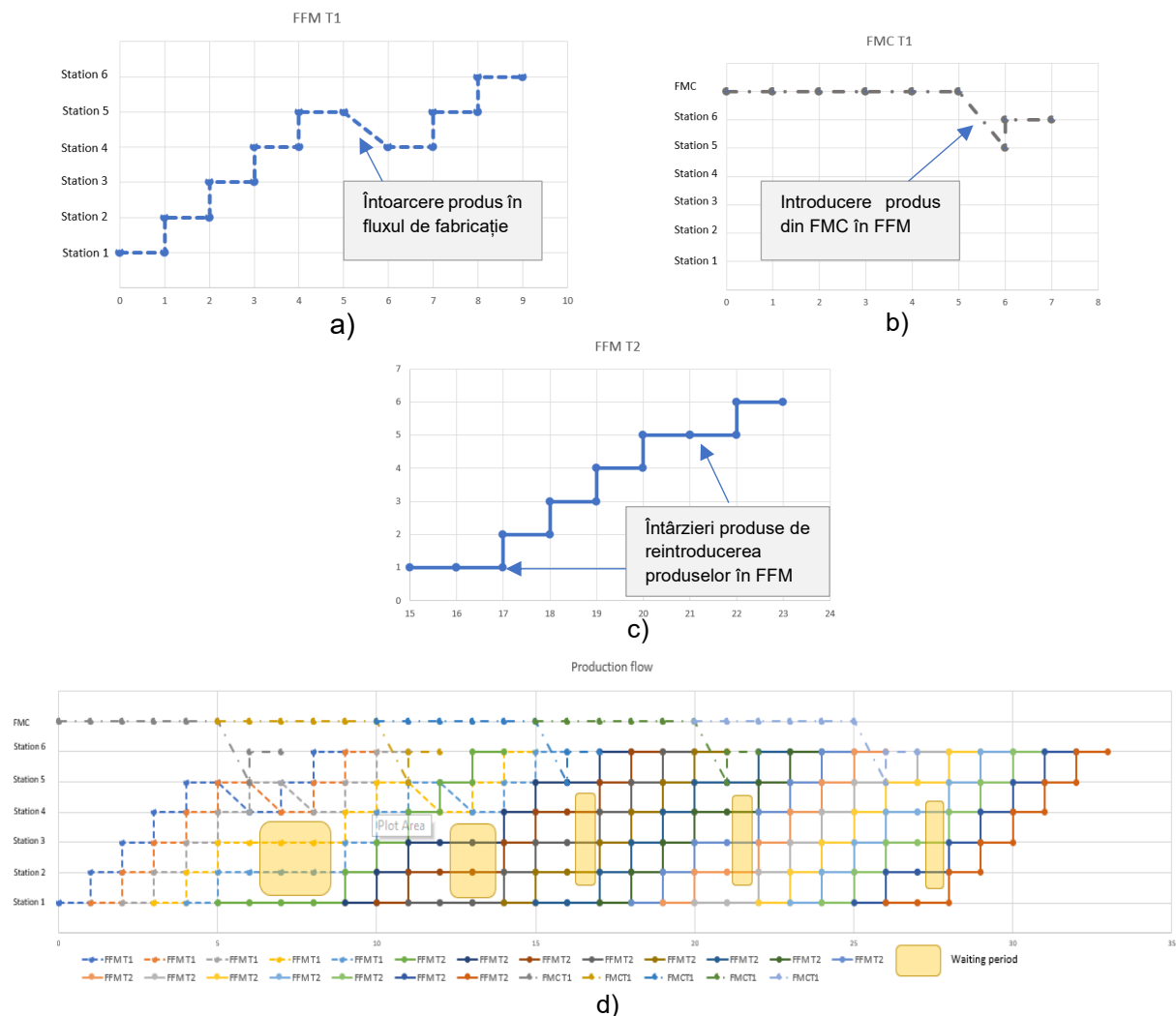


Figura 55. a) Planificarea fabricației unui produs Tip 1 pe FFM; b) Planificarea fabricației unui produs Tip 1 pe FMC; c) Planificarea fabricația unui produs Tip 2 pe FFM; d) Planificarea fabricației unui de volum de 25 de produse, pe fluxurile paralele FFM și FMC, fără optimizarea secvențelor de așteptare:

- $i = 4$ stația din FFM în care produsul T_1 ajunge prin operația de transport înapoi, pentru reluarea unor operații;
- $i_{Back} = 1$ numărul de stații parcurse de produs la transportul înapoi pornind din stația-nod $i + i_{Back} = 5$; în stația-nod va fi introdus produsul direcționat din fluxul FMC;
- $\theta_{i,T_1} = 0$ pentru etapa de inițializare, întrucât nu există produse ce necesită

Întoarcerea în stațiile anterioare.

În cadrul planificării simple, producția de produse Tip 1 pe FMC este continuă, fără întreruperi. Pe fluxul FFM se lansează în fabricație produsele de Tip 1, cu $\eta = 5$, urmate de produsele Tip 2. Conform strategiei de conducere a fabricației flexibile, produsele Tip 1 sunt retrimise din stația curentă - nod de întoarcere, la stația anterioară, pentru un nou set de operații. Concomitent, fiecare produs, fabricat pe FMC, va fi inserat în fluxul FFM, în stația-nod de întoarcere, eliberată. Astfel se vor genera timpi lungi de așteptare (Figura 55).

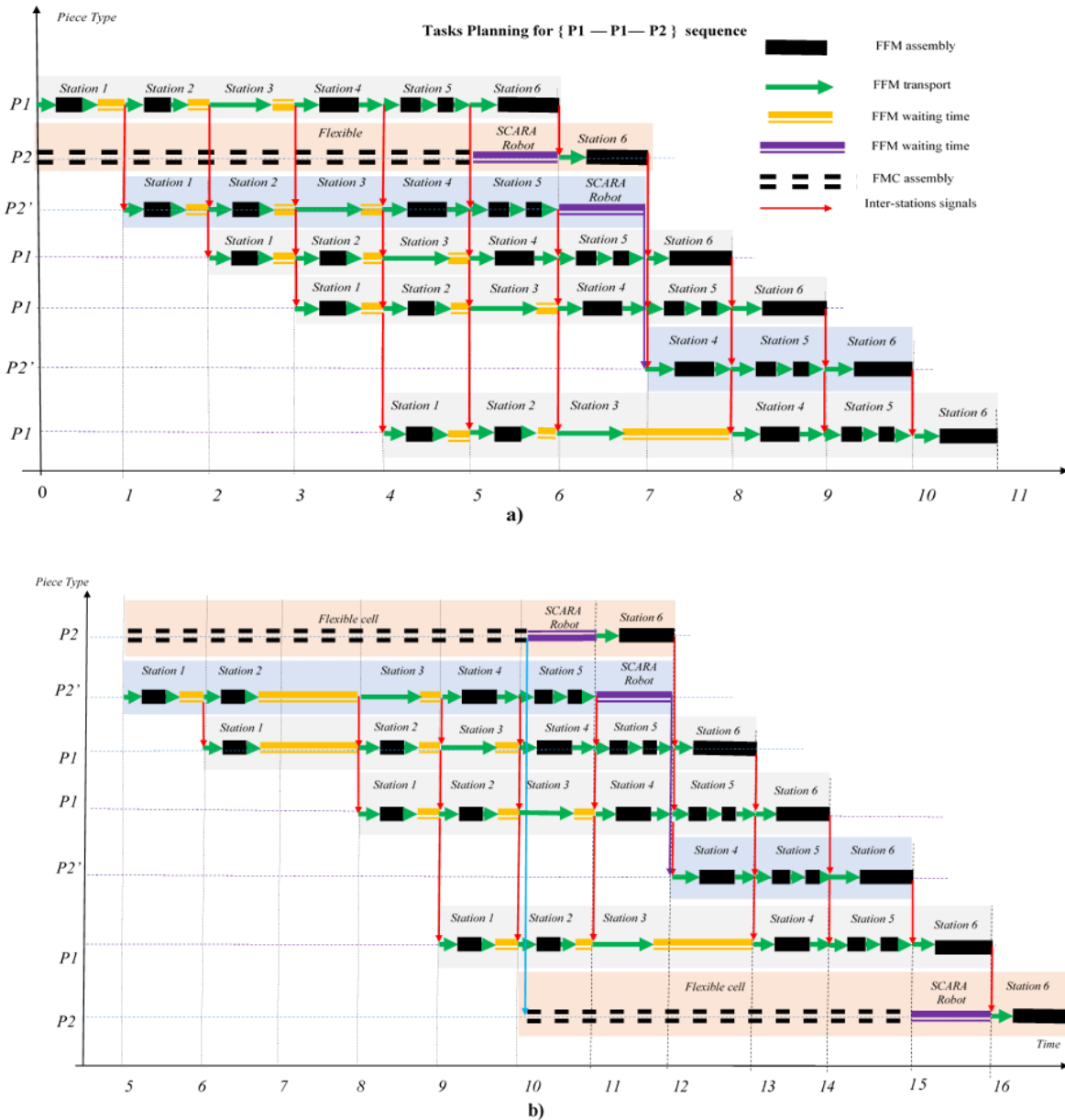


Figura 56. a) Secvența de inițializare a planificării optimale a fabricației pe fluxurile FFM și FMC; b) Planificarea optimală a unui ciclu de producție pentru secvențe repetitive ale fabricației, pe fluxurile paralele FFM și FMC

Acești timpi de așteptare sunt determinați de accesul cu prioritate al produselor Tip 1, returnate și reinserate în stațiile FFM. Astfel, se vor induce timpi de așteptare în stațiile anterioare, cuantificați de duratele generate de re-introducerea și prelucrarea produsului inserat (Figura 55). Dacă din fluxul FMC vor fi introduse/inserate în FFM două produse Tip 1

conform raționamentului din relația (4.22), timpul total de așteptare se reduce, de la un timp maxim teoretic de $10 \cdot T_{prodmax}$ la $8 \cdot T_{prodmax}$.

În cazul aplicării algoritmului de planificare optimală, din relațiile (4.29), (4.32), (4.33) și (4.34) va rezulta secvența de fabricație. Considerând valorile parametrilor, se poate determina numărul de produse Tip 1 care pot fi fabricate pe fluxul FFM. Conform ecuației (4.29), se obține $\eta = 5$, număr de produse de Tip 1 care vor fi fabricate pe fluxul FFM. Celelalte produse, $v_1 - \eta = 5$, vor fi fabricate pe fluxul FMC. Pentru ISFM, respectarea acestei ordonanțări a fabricației, va introduce timpi de așteptare pentru produsele asamblate pe fluxul FFM. În conformitate cu ecuația (4.22), rezultă $\theta_{i,T_1} = 1$ care reprezintă numărul de produse reintroduse în fluxului de fabricație.

Pe baza rezultatelor obținute conform (4.32), factorul de sincronizare poate fi calculat cu $c = 1$, pentru etapa de inițializare și $c = 0$, pentru restul fabricației. Folosind factorul de sincronizare, ordinea de fabricație poate fi determinată din relațiile (4.33) și (4.34). În etapa de inițializare, strategia de producție va respecta relația (4.34), cu inițializarea fabricației simultane a unui produs Tip 1 pe FMC și a unui produs Tip 2 pe FFM. Pentru a satisface condiția din (4.22), se va adăuga un produs Tip 2, în etapa de inițializare, așa cum rezultă ale simulărilor modelelor RPS (Figura 56.a).

După finalizarea etapei de inițializare, când factorul de sincronizare devine $c = 0$, se va aplica secvența de planificare a fabricației optimale (4.33). Fabricația simultană se inițializează cu execuția egală, a câte unui produs Tip 1, pe FMC și FFM. Pentru FFM, se obține ordonanțarea producției, pentru un ciclu complet: un produs Tip 1 este urmat de trei produse Tip 2. Acest ciclu se repetă până la fabricarea întregului volum de producție (Figura 56.b).

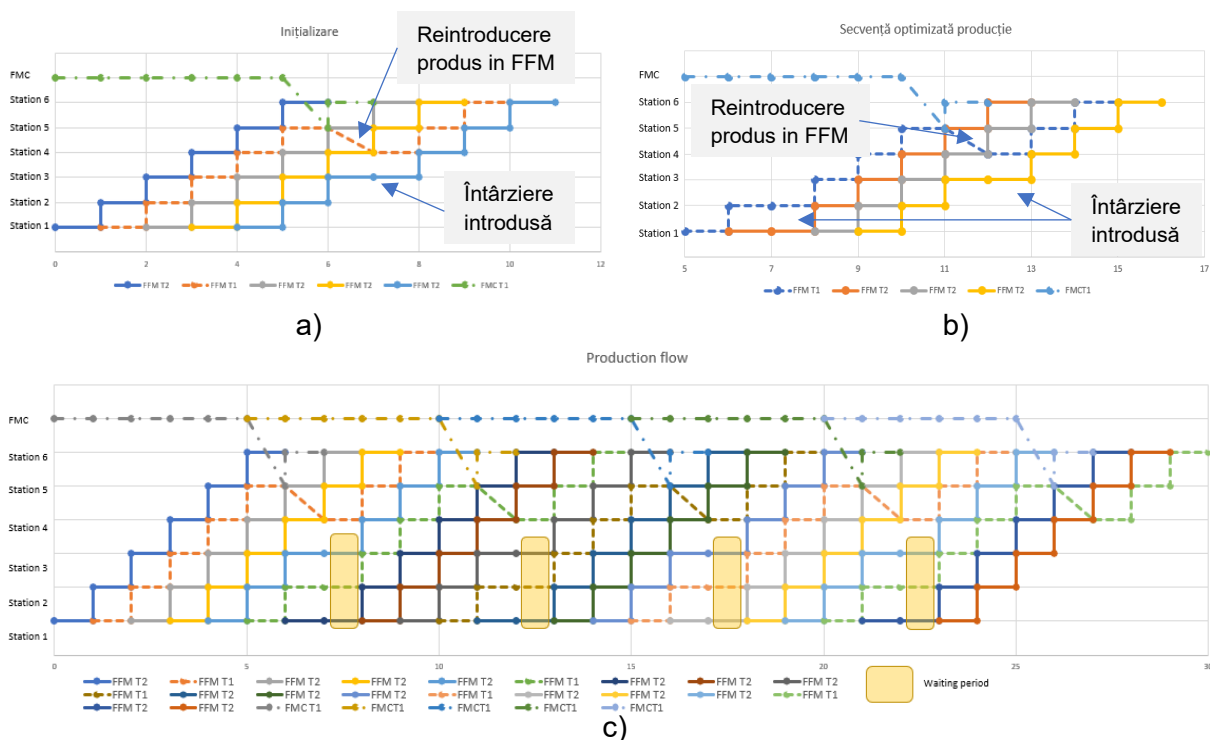


Figura 57. a) Secvența de inițializare din cadrul planificării optimale a fabricației; b) Secvența optimală de producție obținută în urma planificării; c) Planificarea optimală a fabricației unui volum de 25 de produse, pe fluxurile paralele FFM și FMC

Din analiza comparativă a rezultatelor obținute pentru cele două strategii de planificare, optimală și simplă, Figura 57 și Figura 55, se pot face următoarele aprecieri: timpul de așteptare în abordare optimală se reduce la jumătate, de la $8 \cdot T_{prodmax}$ la $4 \cdot T_{prodmax}$; utilizarea resurselor de producție este îmbunătățită în planificarea optimală, prin reducerea timpului de așteptare corespunzător primelor trei stații (Figura 57). În cazul planificării simple, în primele patru stații se generează timpi mari de așteptare, pentru fabricația produselor Tip 1 (Figura 55).

În urma reducerii timpilor de așteptare și a planificării producției, durata totală de fabricație conform planificării optimale a fost redusă cu 9%, comparativ cu planificarea simplă, care reduce timpii de așteptare, de la $33 \cdot T_{prodmax}$ la $30 \cdot T_{prodmax}$. Rezultatele au fost verificate și prin simulări ale modelul RPT, pentru ISFM. Astfel, în raport cu timpul maxim de producție, 45 secunde, prin utilizarea celor două strategii de planificare se obține următorul bilanț: un timp total de operare de 1485 secunde pentru planificarea simplă și un timp total de operare de 1350 secunde pentru planificarea optimală.

5.2. Aplicație Client-Server pentru planificarea optimală a fabricației paralele, în abordare specifică Industriilor 4.0 și 5.0

Implementarea algoritmului de planificare optimală, a impus modelarea procesului de colectare a datelor, prelucrare și transmitere a informațiilor, cu RP specializate, RPS, RPT. Algoritmul a fost interfațat cu o aplicație software Client-Server, care, prin serverul Cloud, va stoca cererile de producție, colectate în timp-real. Astfel aplicația Client-Server, prin colectarea și transferul de date, se conectează în timp-real cu conducerea și planificarea optimală a fabricației. Procesul de colectare a datelor, se realizează prin operare directă pe interfața aplicației Client-Server, găzduită de serverul Cloud. Astfel, aplicația Client-Server devine o platformă de colectare a cererilor de producție, particularizate de opțiunile și necesitățile clienților. Întregul sistem se conectează la factorul uman, care devine astfel parte centrală în dinamica procesului, concept specific Industriei 5.0.

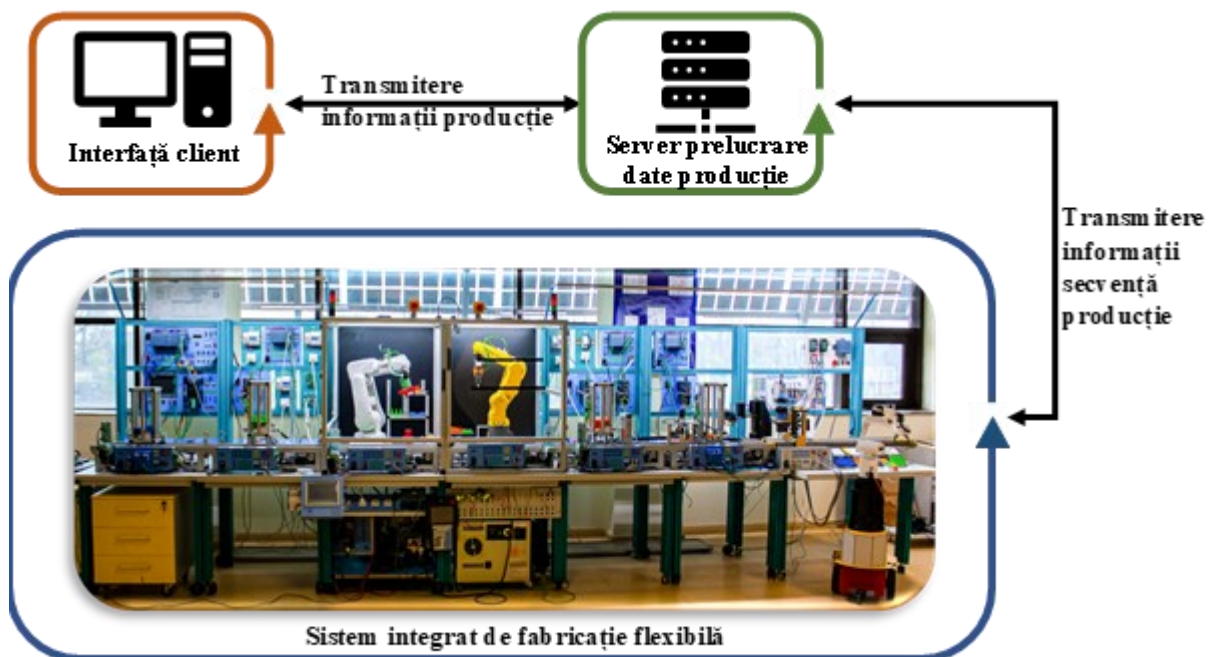


Figura 58. Dinamica fluxului de date Client – Sistem de fabricație

Dinamica operațiilor de colectare, prelucrare și transmitere a informațiilor, a fost reprezentată în modele RPS. Componentele software ale Aplicației Client-Server, prin modelare cu RPS, au permis identificarea blocajelor informaționale, și detectarea eventualelor erori de comunicație. Pentru implementarea achiziției de date și gestiunii fluxului de informații de la client la proces, au fost aplicate tehnologii performante de IoE.

Sistemul informatic pentru colectare și prelucrare a informațiilor a fost modelat cu RPS

$$RPS_{recv} = \langle RPT_{recv}, E_{drecv}, Sync_{recv} \rangle. \quad (5.1)$$

Rețeaua Petri temporizată este dată de

$$RPT_{recv} = \langle P_{recv}, T_{recv}, I_{recv}, O_{recv}, m_{0recv}, temp_{recv} \rangle. \quad (5.2)$$

În cadrul modelului RPT mulțimea pozițiilor este reprezentată de $P_{recv} = \{P_{int}, P_{opt}, P_{man}, P_{ctrecv}\}$. Componentele pentru reprezentarea stărilor sunt:

$P_{int} = \{P_i\}_{i=1,6}$ - mulțimea stărilor asociate informațiilor colectate prin interfața client;

$P_{opt} = \{P_j\}_{j=7,10}$ - mulțimea stărilor asociate informațiilor corespunzătoare secvențelor de fabricație, transmise sistemului flexibil de fabricație;

$P_{man} = \{P_{11}\}$ - mulțimea stărilor asociate duratei producției totale, a fabricației;

$P_{ctrecv} = \{P_{12}, P_{13}\}$ - mulțimea stărilor asociate validării logice a unei acțiuni, respectiv transmiterea mesajelor "pierdute" – care nu au fost livrate la ISFM, pentru execuția unei secvențe de fabricație.

Mulțimea tranzițiilor rețelei este reprezentată de $T_{recv} = \{T_{int}, T_{opt}, T_{man}\}$, unde componentele pentru reprezentarea tranzițiilor sunt:

$T_{int} = \{T_i\}_{i=1,4}$ - mulțimea tranzițiilor discrete asociat procesului de preluare/colectare a informațiilor de la client;

$T_{opt} = \{T_j\}_{j=5,9}$ - mulțimea tranzițiilor discrete asociat procesului de prelucrare a informațiilor de la client și obținerea planificării optimale a fabricației.

$T_{man} = \{T_{10}\}$ - tranziția discretă asociată procesului de fabricație.

Funcția de ponderare a arcelor de intrare reprezintă ponderile arcelor care în cadrul modelului conectează anumite poziții cu anumite tranziții

$$I_{recv} : (P_{recv} \times T_{recv}) \rightarrow Q_+. \quad (5.3)$$

Funcția de ponderare a arcelor de ieșire reprezintă ponderile arcelor care în cadrul modelului conectează anumite tranziții cu anumite poziții

$$O_{recv} : (T_{recv} \times P_{recv}) \rightarrow Q_+. \quad (5.4)$$

Temporizările asociate tranzițiilor modelului RPT sunt definite de

$$temp_{recv} : T_{recv} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (5.5)$$

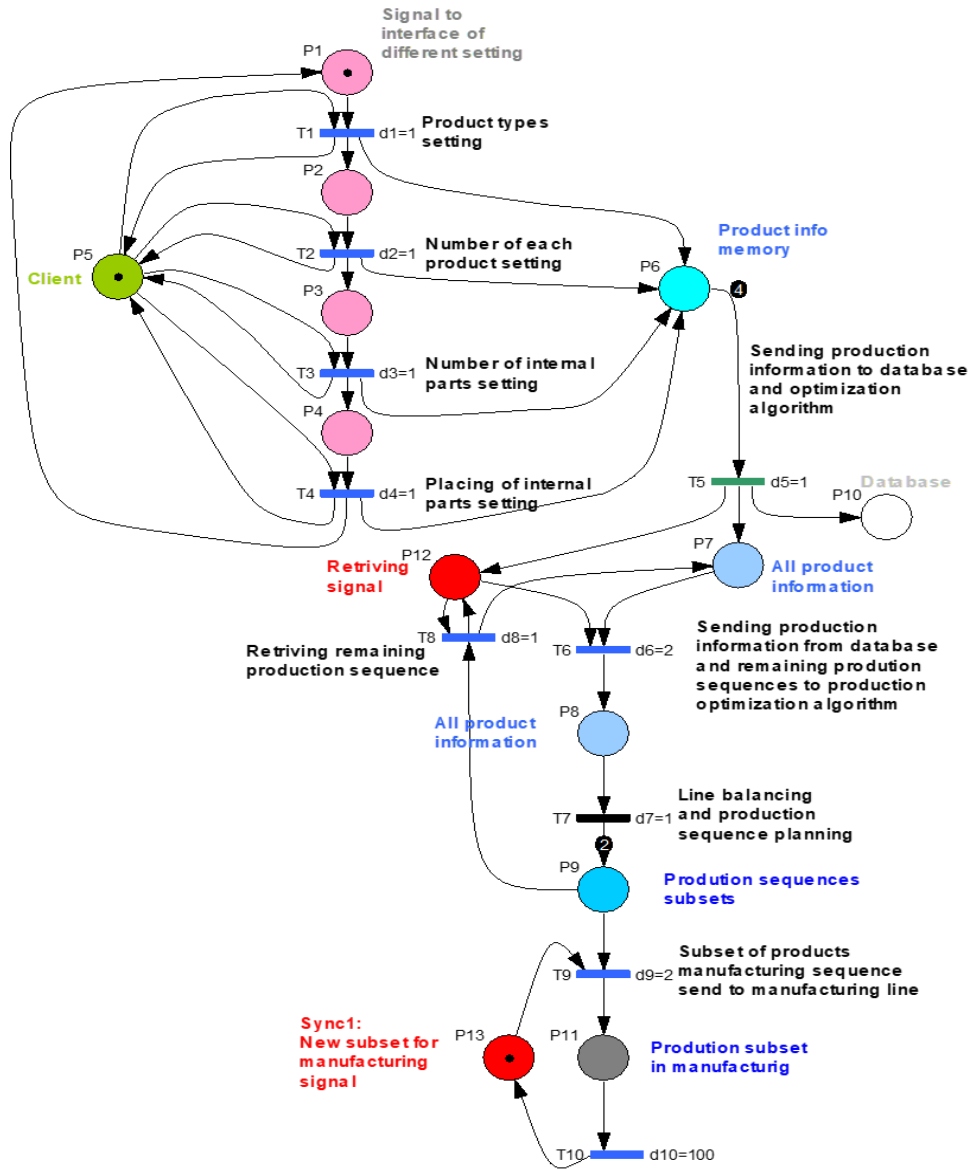


Figura 59. Modelul RPS pentru colectarea și prelucrarea informațiilor de producție

Marcajul inițial al modelului, care reprezintă vectorul cu marcaje asociat stărilor inițiale, reprezentat de

$$m_{0recv} : P_{recv} \rightarrow Q_+ \cup \{0\}. \quad (5.6)$$

Evenimentele externe, reprezentate de E_{drecv}^1 , sunt asociate semnalelor externe de sincronizare utilizate în controlul procesului

$$E_{drecv} = \{E_{drecv}^1\} \cup \{e_{recv}\}. \quad (5.7)$$

Funcția $Sync_{recv}$ reprezintă asocierile dintre tranziții și evenimentele externe de validare:

$$Sync_{recv} : \{T_9\} \rightarrow \{E_{drecv}^1\} \cup \{e_{recv}\}, \quad (5.8)$$

Unde “ e_{recv} ” reprezintă evenimentul noul încorporat monoidul E_{drecv}^* . Astfel pentru $Sync_{recv}$ se definește funcția de sincronizare:

$$Sync_{recv} : T_9 \rightarrow \{E_{drecv}^1\}, \quad (5.9)$$

$E_{drecv}^1 = Sync_{recv}$ reprezintă semnalul de sincronizare a transmiterii secvențelor de operații succesive de fabricație, către ISFM, cu momentul de start al fabricației ultimului produs, din secvența anterioară.

Prin simularea modelului RPS, se obțin informații privind transferul de date de la client (prin intermediu interfeței de colectare a comenzilor de producție), la ISFM. În graficul din Figura 60 generat prin simularea modelului RPS, sunt evidențiate etapele procesului de colectare, prelucrare și transmitere a informației.

Astfel, sunt vizibile secvențele parcurse în Interfața_Client, pentru configurarea personalizată a unui produs. După parcurgerea secvenței de configurare a produsului, se inițiază prelucrarea datelor de producție. Rezultatul prelucrării acestor date, pe baza algoritmului propus, este generarea planificării optimale a fabricației. Aceste informații sunt stocate în serverul *Cloud* și trimise ISFM cu fluxuri paralele, în funcție de disponibilitatea capacităților de prelucrare.

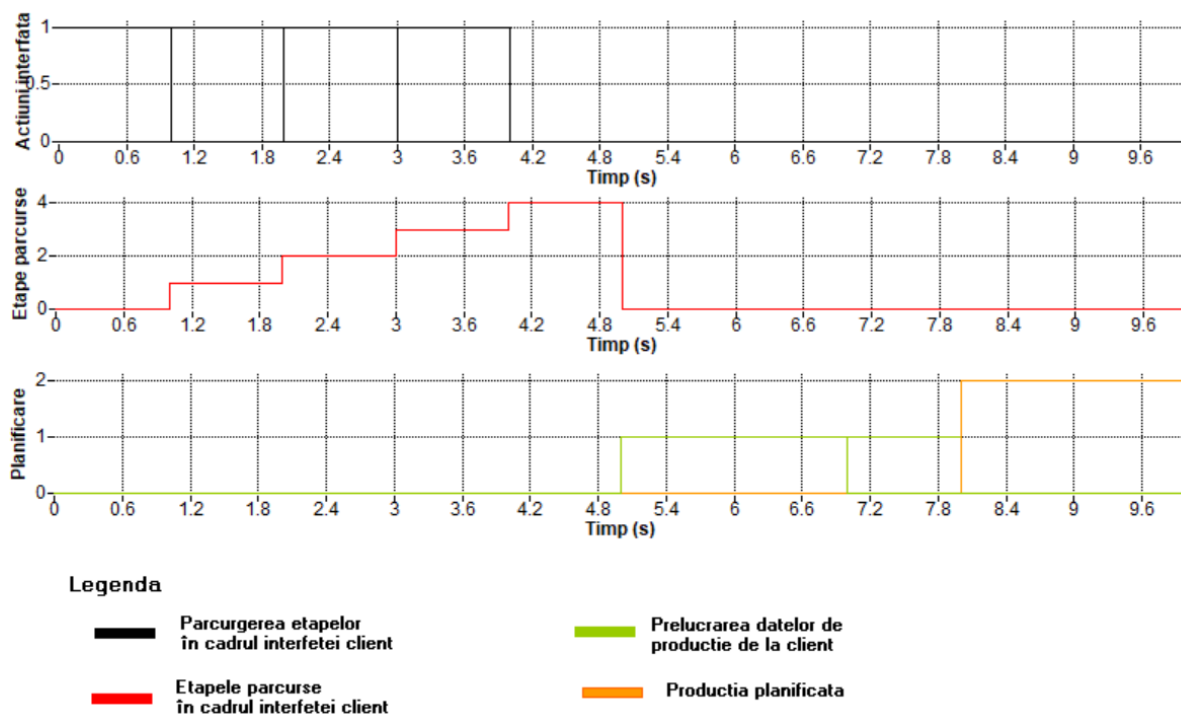
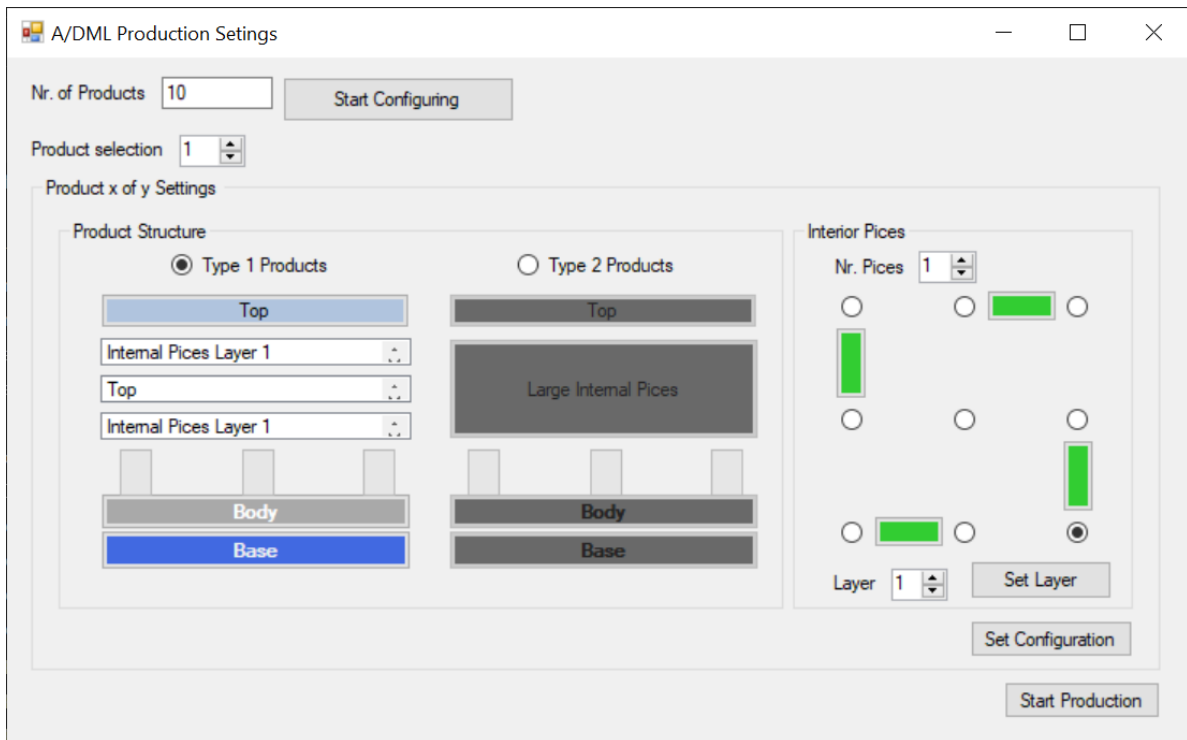


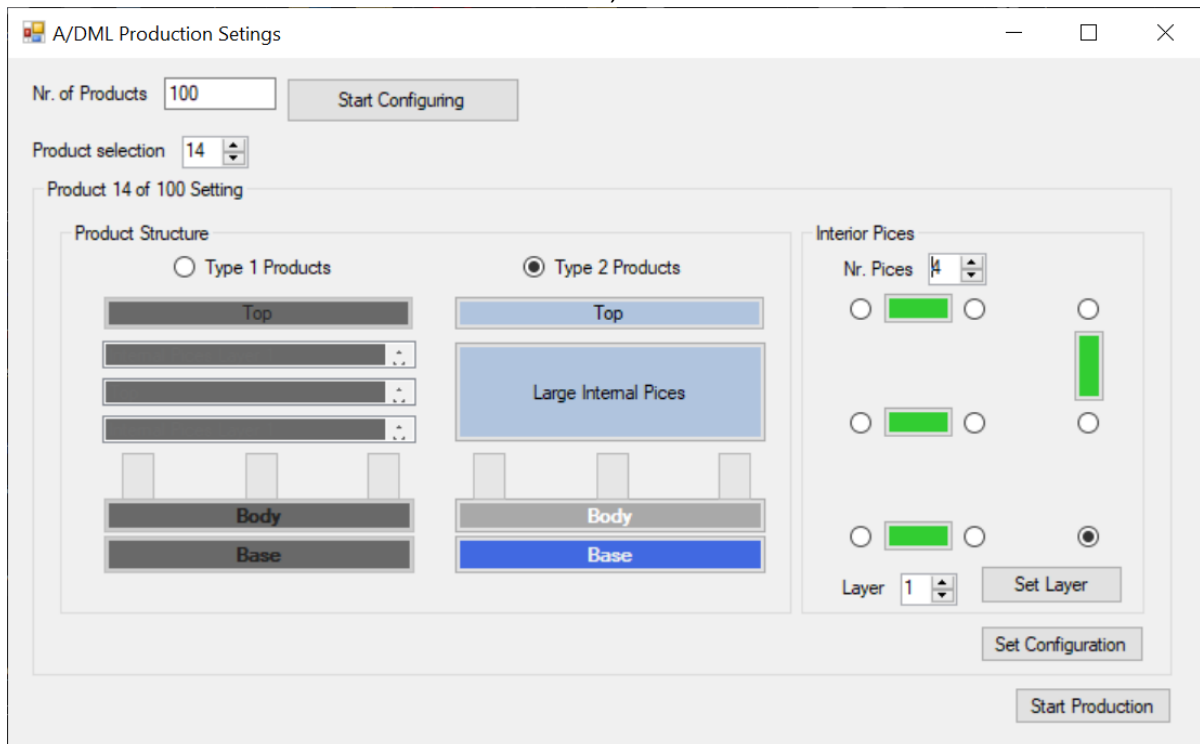
Figura 60. Simularea modelului RPS al Aplicației Client-Server

La *server*-ul aplicației Client-Server, pot fi conectate prin intermediu conexiunii Ethernet, diverse interfețe și aplicații software care facilitează accesul clienților la operația de configurare a cererii de producție. În Figura 61, este prezentată o aplicație destinată configurării la distanță a cererii de producție. Interfața oferă acces pentru personalizarea cererii de produse, respectiv configurarea numărului de produse și a tipologiei, precum și configurația componentelor pe straturile interne, pentru fiecare produs. Informațiile de configurare sunt trimise către server, unde ulterior sunt stocate și procesate, pentru a genera structuri informaționale pentru planificare optimală a producției. Pe baza acestor informații de configurare, serverul generează

o secvență de sarcini, pe care o transmite ISFM. În cazul cererilor hibride sau mixte, de produse aparținând unei game de fabricație, secvențele de sarcini devin entități stocate în



a)



b)

Figura 61. a) Interfața de configurare a unui produs Tip 1 în Aplicația Client-Server; b) Interfața de configurarea unui produs cu Tip 2 în Aplicația Client-Server

coada de producție. Informațiile de producție sunt preluate de ISFM, pe baza legii de servire FIFO și transmise la interfața internă a procesului de conducere a ISFM.

În modelul RPS asociat dinamici informațiilor din interfața client, variabilele pentru colectarea datelor, din Interfața_client sunt asociate mulțimea $\{P_{int}\}$ (relația (5.2)). Interfața oferă controlul editării/selecției datelor: tipologia produselor, numărul de produse, numărul de componente în straturile intermediare, configurația straturilor intermediare cu componente. Acest lucru reduce durata de prelucrare a cererii, comparativ cu introducerea acestor specificații, de către operator, prin intermediul interfeței HMI.

În abordarea Industriei 5.0, dezvoltarea sistemelor industriale centrate pe factorul uman, respectiv implicarea directă a clientului, în procesul de fabricație, asigură o transparență deplină între producător și mediul social, în acord cu necesitățile și preferințele acestuia. În același timp, conceptele specifice Industriei 5.0., respectiv *fabricație sustenabilă*, și *sustenabilitatea mediului* înconjurător, se reflectă în fabricația de produse personalizate, cu impact minim invaziv asupra mediului. Prin intermediul interfeței software, comenzile de producție sunt preluate în orice moment, fără a depinde de programul de activitate al unui operator, ceea ce conduce la creșterea competitivității dar și la adresabilitatea extinsă a potențialilor clienți.



Figura 62. Aplicație Client-Server conectată cu sistemul integrat pentru fabricația flexibilă

5.3. Rezultate și contribuții științifice

Pentru îndeplinirea obiectivului **OB.5**, algoritmul propus în capitolul anterior a fost implementat pentru planificarea optimală a fabricației pe ISFM de laborator, și a fost validat prin studii de caz (**OB.5.1**). În final, se propune proiectarea și implementarea unei aplicații Client-Server care asigură, prin serverul *Cloud*, interfațarea algoritmului de planificare optimală, cu colectarea și prelucrarea în timp-real a comenzilor/cererilor de producție (**OB.5.2**). Întregul demers precum și rezultatele obținute, situează implementarea planificării optimale în zona de realizare a planificărilor performante, cu aplicabilitate în planificarea optimală a

sistemelor de fabricație cu fluxuri paralele. Implementarea algoritmului propus, aplică concepte specifice Industriilor 4.0 și 5.0.

În această secțiune s-au atins obiectivele specifice **obiectivului general OB.5**, privind implementarea unui algoritm de planificare optimală a fabricației flexibile, cu fluxuri paralele. Algoritmul a fost particularizat pe un sistem integrat pentru fabricația flexibilă, cu două fluxuri paralele. Pentru implementarea algoritmului a fost realizată o platformă software dedicată colectării cererilor/comenzilor de producție, și stocarea acestor date pe un server *Cloud*. Algoritmul a fost implementat și testat pe scenarii de producție, iar rezultatele au evidențiat eficiența și câștigul economic pe care le aduce aplicarea planificării optimale. Convergența planificării optimale cu conducerea în timp-real a fabricației flexibile, permite adaptarea automată a sistemului la diferite cereri de producție, cu respectarea condiției de productivitate ridicată, fără consum suplimentar de resurse hardware, ceea ce îl recomandă ca o contribuție științifică importantă.

Un rezultat semnificativ al cercetărilor îl reprezintă **integrarea conceptelor Industriei 4.0 și 5.0** în managementul fabricației flexibile, cu fluxuri paralele. Astfel, s-au realizat proiectarea și implementarea unei **platforme software_Client-Server** care asigură, prin serverul *Cloud*, interfațarea algoritmului de planificare optimală, cu secvențele de preluare în timp-real a comenzilor de producție, precum și monitorizarea procesului de producție. Platforma software Client-Server reintegrează în proces clientul / factorul uman care operează, în interfața client, cereri de producție personalizate. Mai mult, personalizarea configurației produsului care se lansează în fabricație, readuce la panoul de comandă al procesului, prin Interfața HMI, operatorul uman. **Platforma software_Client-Server** găzduită de Serverul *Cloud*, este o realizare semnificativă în sensul aplicării conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0, relativ la: reintegrarea forței de muncă în industrie, aplicarea fabricației distribuite, hiper-personalizarea fabricației. Prin integrarea conceptelor Industriilor 4.0 și 5.0, se realizează implementarea unui ISFM adecvat conceptelor de sustenabilitate a resurselor de producție, sustenabilitate a mediului, reziliență, și reintegrare a factorului uman, în procesele industriale.

Concluzii și contribuții științifice

Dezvoltarea sistemelor complexe pentru fabricația flexibilă, asistate de sisteme robotice, echipamente și tehnologii avansate specifice Industriilor 4.0 și 5.0, a impus utilizarea unor instrumente specializate de modelare, RPT și RPS, precum și implementarea unor structuri pentru conducerea avansată. Simulările modelelor RPS, oferă informații valoroase relativ la temporizările operațiilor, temporizările asociate disponibilității resurselor, sincronizările în execuția secvențelor de operații interconectate temporal, sincronizări de subprocese, partajări de resurse, etc. Pe baza informațiilor obținute, s-au proiectat și implementat structuri avansate pentru conducerea în timp real a sistemelor de fabricație flexibilă, algoritmi de planificare optimală, tehnici de conducere a fabricației flexibile, în viziunea integratoare a conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0.

Întregul demers al cercetărilor teoretice și experimentale, care au utilizat infrastructura logistică a *Laboratoarelor de cercetare din Institutul de Cercetare Științifică și Tehnologică Multidisciplinară (ICSTM)* al Universității Valahia din Târgoviște, s-a derulat în cadrul proiectului de cercetare PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0290, câștigat prin competiția Proiecte complexe realizate în consorții CDI (PCCDI), PN 2345577, coordonat de Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați [82].

Această teză are ca *principală contribuție* proiectarea și implementarea tehnicilor de adaptare a unei linii de fabricație în flux, la un sistem integrat pentru fabricația flexibilă, deservit de sisteme robotice, cu integrarea unor concepte de Industrie 4.0 și 5.0. Sistemul integrat pentru fabricație flexibilă a fost proiectat să răspundă conceptului integrator de fabricație totală, în sensul implementării unui ciclu complet de operații, asamblare, dezasamblare, recuperare și reutilizare de componente.

În etapa preliminară, s-a propus structura hardware **IFMS_4.0_5.0**, complet echipată din punct de vedere al capacităților specifice fabricației flexibile, recuperării și reutilizării de componente. Structura hardware conectează succesiv șapte stații de lucru, deservite de trei sisteme robotice (ABB, FANUC, SCARA) și un robot mobil autonom Pioneer. Toate subsistemele, deși comandate independent, funcționează ca sisteme interconectate informațional prin comunicația Profinet.

IFMS_4.0_5.0 integrează un pachet semnificativ de concepte, specifice Industriilor 4.0 și 5.0. Concepte de *Industrie 4.0* se regăsesc în abordarea de sistem total automatizat, dezvoltat pe structură de CPS, în care procesele și echipamentele, complet automatizate, utilizează suportul de comunicație al IoE.

În abordarea propusă, procesul de producție este conectat la mediu, prin funcțiile specifice ciclului complet de utilizare/recuperare/reutilizare a resurselor naturale. Astfel, s-a propus un sistem de fabricație subordonat problemelor de mediu, prin integrarea politicii de *sustenabilitate* a resurselor. Mai mult, conceptul de *reziliență* guvernează adaptarea sistemului IFMS_4.0_5.0 la diferite strategii de conducere a fabricației, în condițiile menținerii eficienței și performanțelor de producție. Această abordare, situează IFMS_4.0_5.0 în aria științifică de complementaritate a *Industriei 4.0, cu Industria 5.0*.

Proiectarea conducerii proceselor și a sistemelor robotice, subordonată conceptului *Digital twin*, s-a bazat pe interfațarea și sincronizarea rezultatelor simulării modelelor RPS, cu conducerea în timp real a proceselor. Comunicația sistemului robotic SCARA și a robotului mobil Pioneer, cu subprocese din IFMS_4.0_5.0, este bazată pe conceptul IoT.

Dincolo de aceste aspecte, dezvoltarea sistemului de fabricație, în viziunea Industriei 5.0, este focusată pe *reintegrarea factorului uman* în procesul industrial. Este o abordare complementară Industriei 4.0, prin care se propun intervenții ale factorului uman în sensul valorificării experienței de lucru și decizionale, intervențiilor personalizate în probleme specifice, aspecte care plasează factorul uman, respectiv operatorul și/sau clientul, în pozițiile cheie ale procesului de producție.

Dotarea ISFM cu HMI, conectează sistemul complet automatizat la *factorul uman-operatorul (Industrie 5.0)*. Operatorii definesc caracteristicile produselor, parametrii fabricației, dar sunt și factorii de decizie, atunci când monitorizarea procesului indică situații critice. Întregul proces este interfațat și cu *factorul uman-clientul*. Acesta este conectat la achiziția și/sau colectarea datelor specifice fabricației, în acord cu interfața *aplicației Client-Server*. Aplicația adresează, prin serverul de *Cloud*, un volum mare de date, corespunzător opțiunilor personalizate ale clienților. Prin interfața aplicației Client-Server, se operează preluarea și transmiterea cererilor de produse personalizate, a datelor tehnice relativ la produse și termene de livrare, într-o informație structurată corespunzătoare sarcinii de producție. Realizarea produselor personalizate promovează un sistem de fabricație *sustenabil (Industrie 5.0)*, prin satisfacerea nevoilor și preferințelor clienților, ceea ce conduce la o utilizare eficientă și durabilă a resurselor.

În următoarea etapă, s-a convenit concentrarea efortului de cercetare strict pe componenta de producție, sau asamblare, pentru *sistemul integrat pentru fabricație flexibilă - IFMS*. Cercetări și dezvoltări posibile, în conexiune cu tematica dezasamblării, recuperării și reutilizării de componente, este alocată unor preocupări viitoare.

IFMS poate lucra atât ca sistem destinat fabricației în flux a produselor cu *tipologie unică*, cât și ca sistem pentru fabricația flexibilă, având capacitate de adaptare a fabricației la diferite tipologii de produse – *game de fabricație*. Prin realizarea conceptuală și hardware a ISFM, s-a contribuit la diversificarea capacității de producție, implicit la creșterea productivității, cu costuri minime. Aspectul costurilor minime vizează conservarea structurii hardware inițială, sau echiparea minimală a IFSM cu resurse suplimentare - stații de lucru, sisteme robotice, alte echipamente. IFMS a fost adaptat fabricației flexibile cu două fluxuri paralele, fiind deservit de trei manipolatoare robotice industriale. Pentru fabricația flexibilă, IFMS a fost echipat cu un sistem robotic SRTS dedicat operațiilor de manipulare și transport, în vederea repetării unor secvențe de asamblare. Astfel a fost implementat conceptul de fabricație diversificată din punctul de vedere al tipologiilor de produse, respectiv fabricația flexibilă. Mai mult, ISFM este un sistem cu capacitate ridicată de producție, datorită fabricației simultane, pe fluxuri paralele.

În proiectarea și implementarea tehnicilor de adaptare a unei linii de fabricație în flux, la sistemul integrat pentru fabricația flexibilă, cercetările s-au derulat în trei etape: ●analiza și modelarea sistemului de fabricație în flux, pentru produse cu tipologie unică; ●analiza și proiectarea hardware a ISFM; modelarea proceselor și subproceselor implicate în fabricația flexibilă; ●implementarea tehnicilor de adaptare a fabricației în flux, la sistemul integrat pentru fabricația flexibilă.

Proiectarea conducerii IFMS s-a bazat pe aplicarea conceptului *Digital twin* prin care se interfațează rezultatele simulărilor modelelor RPS - modelul RPS al întregului proces, respectiv

modelele locale RPS ale stațiilor de lucru, cu conducerea în timp real ISFM. Simularea *modelelor avansate RPS* oferă informații despre operațiile cu derulare secvențială, precum și despre sincronizări ale operațiilor cu execuție paralelă, sau interconționată. Prin evaluarea acestor informații, se pot determina cazurile de apariție a erorilor, a stărilor de blocaje sau a sincronizărilor defectuoase. Astfel, s-au identificat soluții pentru: minimizarea timpilor de așteptare, sincronizarea fluxurilor de producție pentru cele două sisteme de fabricație flexibilă, și sincronizarea task-urilor interconționate.

Comparând rezultatele simulărilor RPS pentru stațiile IFSM, cu rezultatele monitorizării în timp real a deplasării produsului, au rezultat diferențe cauzate de acțiunea perturbațiilor. Astfel, s-a propus conducerea automată a *transportului* pe conveioare, pentru *poziționări precise*, cu rejectarea perturbațiilor. În proiectarea structurii de conducere, s-a considerat acțiunea perturbațiilor aditive pe intrarea și ieșirea procesului.

Modelul matematic al procesului și funcția de transfer, s-au determinat cu aplicația specializată în identificarea proceselor, sub platforma software Matlab. În acest demers s-au realizat obiectivele: ●identificarea modelului procesului și a perturbațiilor, pentru o stație; ●implementarea structurii de conducere a transportului în stații, sub acțiunea perturbațiilor; ●poziționarea în punctul de lucru; ●compensarea perturbațiilor. Pentru implementarea conducerii automate, s-a propus o îmbunătățire a algoritmului de declanșare a *controlerului PID_E*, prin modificarea semnalului declanșator. Acesta va fi generat de comparația/diferența dintre eroarea curentă și eroarea de referință, prin măsurări ale poziției, în locațiile cheie. Prin utilizarea conducerii cu PID_E, care aplică plafonarea mărimii de comandă, s-au obținut performanțe similare celei cu PID convențional. Îmbunătățirea controlului bazat pe evenimente poate fi realizată prin implementarea *conceptului Digital twin*, care are la bază compensarea erorilor dintre parametrii simulării modelului digital și cei generați de conducerea în timp real.

Deoarece IFMS lucrează pe două fluxuri de fabricație paralele, s-a propus un *algoritm pentru planificarea optimală* a producției, care poate fi personalizat în funcție de structura hardware. Algoritmul a fost particularizat pentru ISFM, cu două sisteme de fabricație flexibilă: Celula flexibilă și Linia de fabricație flexibilă în flux. Obiectivele specifice planificării optime vizează minimizarea timpilor de fabricație, pe cele două fluxuri, și echilibrarea sarcinilor, pentru procesele FFM și FMC. Algoritmul a fost testat și integrat în conducerea sistemului flexibil, pe baza unor scenarii de planificare optimală. Implementarea conducerii procesului, pe baza planificării optime, a fost dezvoltată în conexiune cu concepte de Industrie 4.0 și 5.0. Astfel s-a realizat o *platformă Client-Server* care interfațează colectarea în timp real a comenzilor de producție, cu algoritmul de planificare optimală a fabricației, prin intermediul unui server *Cloud*. Secvențele de producție, generate de algoritmul de planificare optimală, sunt transmise ca date de inițializare a fabricației pe ISFM.

În concluzie, aplicarea conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0 se concretizează în soluții și concepte originale pentru: ●proiectarea structurii hardware de adaptare a fabricației în flux, la fabricația flexibilă pe fluxuri paralele; ●modelarea și implementarea conducerii avansate a ISFM; ●implementarea conducerii robuste; ●planificarea optimală a fabricației; ●readucerea factorului uman în proces, respectiv operatorul / clientul și interfața HMI / interfața Client-Server. Toate acestea, evidențiază succesul acestui demers atât în ceea ce privește implementarea unui sistem de fabricație original, dar și prin integrarea unui pachet semnificativ de concepte specifice **Industriilor 4.0 și 5.0**, după cum urmează:

- ✓ IFSM_4.0_5.0 cu structură CPS, generată de convergența resurselor fizice cu cele cibernetice, integrează conceptul de *sustenabilitate* a fabricației, prin implementarea

funcțiilor de *asamblare, verificare a calității, dezasamblare, recuperare și reutilizare a componentelor*;

- ✓ sistemul integrat pentru fabricație flexibilă este subordonat strategiilor antreprenoriale și educaționale, relativ la conceptul *Educație 5.0*. Aspectul educațional este valorificat prin utilizarea amplă a conceptelor și instrumentelor avansate, de tip RPS, în sarcini de proiectare și modelare specifice sistemului de laborator;
- ✓ sistemul integrat pentru fabricație flexibilă implementează concepte și tehnologii avansate, relativ la proiectarea și modelarea structurii hardware, dar și la proiectarea și implementarea structurilor avansate pentru: *conducerea robustă* - structură de conducere cu compensarea perturbațiilor; *sustenabilitatea producției* - fabricație continuă datorită structurii de lucru cu comutare pe fluxuri alternative, în caz de avarie a fluxului curent; *sustenabilitatea mediului* - proiectarea unui sistem sustenabil orientat pe fabricație totală - producție/recuperare/reutilizare de componente;
- ✓ sistemul integrat pentru fabricația flexibilă a fost interfațat cu o *Platformă software Client-Server* care reintegrează în procesul industrial *Operatorul/Clientul ca factor uman*, cu sarcini în colectarea comenzilor de producție personalizate. Mai mult, programarea configurației produsului, pentru lansarea în fabricație, readuce la panoul de comandă al procesului operatorul uman, pentru operare pe interfața HMI;
- ✓ *Platforma software Client-Server* găzduită de serverul Cloud, este o realizare semnificativă în sensul aplicării conceptelor Industriei 4.0 și 5.0, relativ la *reintegrarea forței de muncă în industrie, aplicarea producției distribuite și hiper-personalizarea fabricației*.

6.1. Contribuții științifice

În această lucrare de cercetare sunt puse în valoare contribuții științifice integrate în concepte, structuri hardware și tehnici de conducere pentru proiectarea, modelarea, implementarea conducerii și planificarea optimă, în vederea adaptării fabricației în flux, la un sistem integrat pentru fabricația flexibilă. Aceste propuneri științifice originale, au fost diseminate prin lucrările publicate în jurnale sau la manifestări științifice, organizate pe direcții de cercetare din domeniul Ingineriei sistemelor. Contribuțiile științifice asumate în acest demers, sunt corelate cu concepte și axe de cercetare, după cum urmează:

- ✓ proiectarea unui proces original de fabricație flexibilă în flux, în care fabricația specifică unei game de fabricație și fabricația produselor cu tipologii diversificate, pot fi realizate prin adaptarea unui sistem dedicat fabricației unui singur tip de produs, cu investiții hardware minime. S-a urmărit astfel creșterea eficienței și reducerea costurilor, fără a afecta calitatea produselor obținute. Fabricația flexibilă în flux permite o adaptare rapidă, la cerințele specifice fabricației de tip mono/multi-tipologie de produs, fără a fi necesară reconfigurarea majoră a întregului sistem [LS2], [LS5], [LS8];
- ✓ proiectarea unui proces de fabricație în celulă, parte componentă a sistemului integrat pentru fabricația flexibilă pe două fluxuri. Fabricația în Celula flexibilă realizează asamblarea completă „în stație” a unei tipologii de produse, aferentă gamei de fabricație. Această abordare este potrivită în special pentru producția de loturi mici și medii, unde se cere o mare flexibilitate în ceea ce privește tipurile de produse și volumul de producție [LS2], [LS5], [LS8];

- ✓ dezvoltarea unei tehnici originale de adaptare a sistemelor de fabricație în flux, la sisteme integrate pentru fabricația flexibilă. Această abordare oferă soluții în transformarea proceselor de producție tradiționale, la sisteme de producție hibride, destinate fabricației flexibile, și/sau fabricației în fluxuri paralele, specifice producției de masă. Acest demers constă în îmbinarea avantajelor fluxului de fabricație continuu, cu cele ale unui sistem flexibil de fabricație. Metodele de adaptare, utilizate curent în industrie, propun reconfigurarea inter-conectării stațiilor, care prezintă însă dezavantajul costurilor mari, pentru echipamente suplimentare, dar și o limitare în gradul de diversitate al gamei de fabricație. Prin implementarea tehnicilor propuse în această lucrare, procesul de fabricație se adaptează la o gamă variată de produse, prin utilizarea unui sistem hardware cu un număr minim de stații de lucru, și costuri reduse ale resurselor suplimentare. În plus, aceste tehnici permit adaptarea rapidă și eficientă a producției, la diferite tipologii, fără a fi necesară reconfigurarea sistemului ci doar implementarea planificării optimale a fabricației. O astfel de abordare răspunde conceptului de sustenabilitate a fabricației - specific Industriei 4.0 și 5.0, sistemele de fabricație fiind ușor adaptabile la diversificări ale gamelor de fabricație [LS2], [LS4], [LS5], [LS7], [LS8];
- ✓ Implementarea tehnicilor de adaptare a sistemelor de fabricație în flux, la sisteme integrate de fabricație flexibilă, cu implementarea conceptelor de Industrie 4.0 și 5.0. Această abordare inovatoare, introduce Celula de fabricație flexibilă echipată cu un sistem de manipulare și transport, în poziție de interconectare cu sistemul de fabricație în flux. Rezultă un sistem complet automatizat, adaptabil la caracteristicile oricărui produs din gama de fabricație. În implementarea acestei tehnologii au fost utilizate concepte IoT dar și de integrarea verticală și orizontală a sistemelor de fabricație [LS3], [LS5], [LS6], [LS7], [LS8];
- ✓ utilizarea tehnicilor de modelarea avansată cu RPS, și simularea procesului de asamblare pe un sistem integrat pentru fabricația flexibilă. Simulările modelelor RPS permit evaluarea sincronizării taskurilor în fabricația paralelă, evitarea eventualelor blocaje, ceea ce aduce beneficii semnificative în eficiența producției. Astfel s-au realizat: implementarea controlului de precizie, pentru procesele primare din stații; controlul interacțiunilor; controlul sincronizărilor dintre procesele primare și cele de deservire (transport și/sau manipulare) [LS2], [LS4], [LS7], [LS8];
- ✓ utilizarea RPS pentru modelarea și simularea procesului de asamblare din stațiile de lucru ale IFMS, cu evidențierea sincronizării interconectării acestora. Această abordare aduce beneficii semnificative în optimizarea procesului de producție și îmbunătățirea eficienței globale a sistemului. Prin simularea cu RPS a procesului de asamblare din fiecare stație, se evidențiază fluxul de producție și se pot identifica eventualele blocaje sau inconsistențe de funcționare [LS2], [LS4], [LS7], [LS8];
- ✓ dezvoltarea și implementarea unui algoritm de conducere a transportului pe conveyer a produselor, pentru poziționare precisă, în punctul de lucru din stație. Prin implementarea algoritmilor de conducere cu PID și PID_E, se obține o poziționare precisă, în anumite locații ale sistemului de fabricație, ceea ce elimină sau reduce necesitatea ajustărilor de poziționare [LS1], [LS9];
- ✓ dezvoltarea și implementarea unui algoritm de planificare optimală a sarcinilor de producție, în cadrul IFMS. În acest demers sunt colectate cereri de producție, ca date de intrare în proces. Algoritmul propus generează o planificare a fabricației pentru cele două fluxuri de producție paralele, în funcție de restricțiile recepționate dar și de stocul disponibil [LS2];

- ✓ crearea unei aplicații interactive Client-Server, pentru achiziția și transmiterea datelor de producție. Aplicația Client-Server, prin serverul *Cloud*, permite utilizatorului realizarea unei cereri de producție personalizate. Procesarea datelor se face prin algoritmul de planificare optimală, care oferă strategia de distribuție a fabricației, pe cele două sisteme de producție paralele. Prin aplicația Client-Server se propune o interfață, care facilitează procesul de colectare și gestionare a datelor de producție, și asigură o planificare eficientă și echilibrată a sarcinilor de producție [LS4].

6.2. Direcții de cercetare viitoare

Considerând rezultatele obținute în cadrul acestei teze de doctorat, s-au identificat posibile direcții de cercetare viitoare:

- dezvoltarea unei aplicații avansate pentru managementul total al sistemului de fabricație. Aplicația, găzduită pe server *Cloud*, poate fi dedicată monitorizării în timp-real a stării și parametrilor fabricației. Astfel, se pot accesa în timp real informații cheie, respectiv volumul de producție, performanțele echipamentelor, timpii de lucru și eventuale probleme tehnice ale echipamentelor, recepționate prin întârzieri mari sau opriri ale fabricației.
- dezvoltarea și integrarea unui concept *Digital twin* inovator, în cadrul buclei de conducere a conveioarelor sistemului de fabricație, pentru poziționări rapide, cu grad ridicat de precizie, și cu compensare a perturbațiilor. Acest model *Digital twin* va oferi o simulare în timp real a comportamentului sistemului de transport și va permite ajustarea rapidă și precisă a poziției produselor.
- Încorporarea roboților mobili autonomi în sistemul de fabricație flexibilă, prin tehnologii specifice de conducere a sistemelor embedded, pentru a îmbunătăți operațiile de manipulare, transport și asamblare a produselor. Conducerea roboților poate integra tehnologii IoT, pentru comunicația cu sistemul de fabricație. Mai mult, se pot implementa sisteme de decizie care să imprime sistemelor robotice funcții autonome, prin care să se asigure o producție eficientă;
- implementarea conceptelor de Big Data, prin colectarea și analizarea eficientă a datelor de producție. Se vor utiliza tehnologii avansate de colectare și analiză a datelor pentru a se obține o înțelegere mai bună a procesului de producție și pentru optimizarea performanțelor sistemului de fabricație. Prin colectarea și analizarea datelor în timp real, se vor putea identifica rapid probleme și defecțiuni în vederea rezolvării acestora. De asemenea, această implementare, prin utilizarea datelor de producție poate îmbunătăți procesul de planificare și cel pentru elaborarea unor decizii mai bine informate referitoare la producția viitoare;
- introducerea senzorilor inteligenți în cadrul procesului pentru fabricația flexibilă pentru detectarea locală a defectelor de producție și integrarea acestora într-un sistem de monitorizare continuă a calității produselor. Acest sistem ar putea detecta și raporta rapid defectele de producție la nivel local, reducând astfel timpii asociați cu repararea sau eliminarea produselor defecte. De asemenea, datele colectate de senzori ar putea fi utilizate pentru a îmbunătăți procesul de producție prin identificarea și analiza tendințelor sistemului. Aceste informații ar putea fi utilizate în optimizarea procesului de producție, pentru îmbunătățirea calității produselor, dar și în procesul de mentenanță;
- implementarea conceptelor de realitate augmentată în vederea proiectării secvențelor de operații pentru realizarea produselor și depanarea sistemelor de fabricație. Astfel,

ar putea fi dezvoltată o aplicație de proiectare cu realitate augmentată, prin care clientul ar putea vizualiza produsul în mediul real, astfel încât să poată analiza și modifica în timp real designul produsului. De asemenea, prin utilizarea tehnologiei de realitate augmentată, operatorii ar putea fi instruiți cu ușurință în asamblarea și depanarea sistemelor de fabricație prin intermediul unei aplicații, care ar afișa instrucțiunile de lucru în timp real, pe baza imaginilor capturate de către dispozitivul mobil.

6.3. Diseminarea rezultatelor

Diseminarea rezultatelor s-a făcut prin publicarea rezultatelor cercetărilor în 9 (nouă) publicații – jurnale și proceedings-uri de conferințe, pe 7 (șapte) dintre aceste având calitatea de autor principal, după cum urmează:

- 5 lucrări prezentate la **conferințe internaționale** IEEE Xplore indexate ISI proceedings Web of Science (WoS);
- 4 lucrări publicate în reviste indexate ISI Web of Science.

6.3.1. Lucrări științifice publicate în reviste

- [LS1]. **Duca, O.**; Minca, E.; Filipescu, A.; Cernega, D.; Solea, R.; Bidica, C. *Event-Based PID Control of a Flexible Manufacturing Process*. Inventions 2022, 7, 86, WOS:000902580500001, ISSN: 2411-5134, <https://doi.org/10.3390/inventions7040086>
- [LS2]. **Duca, O.**; BIDICĂ, C.; Minca, E.; Gurgu, V.; Marius, P.; Dragomir, F. *Optimization of Production Planning for a Flexible Assembly Technology on a Mechatronics Line*. Studies in Informatics and Control, 2021, 30, 53–66, WOS:000636266000005, ISSN: 1220-1766, <https://doi.org/10.24846/v30i1y202105>
- [LS3]. Paun, M.; Gurgu, V.; **Duca, O.**; MINCA, E. *Image Processing Method Based Quality Test On A Smart Flexible Assembly Mechatronic System With Component Recovery*. Journal of Science and Arts, 2020, 20, 1037–1048, WOS:000604620700024, ISSN: 1844-9581, <https://doi.org/10.46939/J.Sci.Arts-20.4-c05>
- [LS4]. **Duca, O.** ; Minca, E.; Paun, M. A.; Gurgu, I.V.; Dragomir, O.E.; Bidica, C. *Petri net modeling of a production system with parallel manufacturing processes*. Journal of Science and Arts. 2023, 23(1), 305-318, ISSN: 1844-9581, <https://doi.org/10.46939/J.Sci.Arts-23.1-c05>

6.3.2. Lucrări științifice publicate în proceeding-uri la conferințe internaționale

- [LS5]. **Duca, O.**; Gurgu, V.; Minca, E.; Filipescu, A.; Dragomir, F.; Dragomir, O. *Optimal Control of the Complete Assembly/Disassembly Cycle for a Mechatronics Line Prototype*. In Proceedings of the 2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC); 2019; 620–625, WOS:000590181100105 , ISSN: 2372-1618, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2019.8885824>
- [LS6]. Paun, M.; Minca, E.; Filipescu, A.; Filipescu, A.; **Duca, O.** *Improved Image Processing Algorithm for Quality Test on a Flexible Manufacturing Mechatronic Line*. In Proceedings of the 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing

-
- (ICSTCC); 2020; 819–824, WOS:000646582900135, ISSN: 2372-1618, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC50638.2020.9259655>
- [LS7]. **Duca, O.**; Minca, E.; Filipescu, A.; Bidica, C.; Paun, M. *Optimal Control of Automated Resupply on a Flexible Manufacturing Mechatronics Line*. In Proceedings of the 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC); 2020; 921–926, WOS:000646582900152, ISSN: 2372-1618, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC50638.2020.9259660>
- [LS8]. **Duca, O.**; Minca, E.; Paun, M.; Gurgu, V.; Dragomir, F.; Bidica, C. *Modeling and Control of Assembly/Disassembly Manufacturing Line Redesigned from Flux to Flexible Manufacturing*. In Proceedings of the 2021 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC); 2021; 535–540, WOS:000859487900088, ISSN: 2372-1618, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC52150.2021.9607071>
- [LS9]. **Duca, O.**; Minca, E.; Filipescu, A.; Solea, R.; Cernega, D.C.; Paun, M.-A. *Event-Based PID Control in a Flexible Manufacturing Proces*. 2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC); 2022; 182-187, WOS:000889980600032, ISSN: 2372-1618, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC55426.2022.9931787>

Bibliografie

- [1] M. Y. Santos, J. O. Sá, C. Costa, J. Galvão, C. Andrade, B. Martinho, F. V. Lima și E. Costa, „A Big Data Analytics Architecture for Industry 4.0,” în *Recent Advances in Information Systems and Technologies*, 2017. ISBN: 978-3-319-56538-5, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56538-5_19.
- [2] D. Li, H. Tang, S. Wang și C. Liu, „A big data enabled load-balancing control for smart manufacturing of Industry 4.0,” *Cluster Computing*, vol. 20, nr. 2, pp. 1855-1864, 2017. ISSN: 1573-7543, doi: <https://doi.org/10.1007/s10586-017-0852-1>.
- [3] J. I. R. Molano, J. M. C. Lovelle, C. E. Montenegro, J. J. R. Granados și R. G. Crespo, „Metamodel for integration of Internet of Things, Social Networks, the Cloud and Industry 4.0.,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 9, pp. 709–723, 2018. ISSN: 1868-5145, doi: <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0469-5>.
- [4] A. Huber și A. Weiss, „Developing Human-Robot Interaction for an Industry 4.0 Robot: How Industry Workers Helped to Improve Remote-HRI to Physical-HRI,” în *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 2017. ISBN: 978-1-4503-4885-0, doi: <http://dx.doi.org/10.1145/3029798.3038346>.
- [5] K. Suri, A. Cuccuru, J. Cadavid, S. Gérard, W. Gaaloul și S. Tata, „Model-based Development of Modular Complex Systems for Accomplishing System Integration for Industry 4.0,” în *5th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Developmen*, 2017. ISSN 2184-4348, doi: <http://dx.doi.org/10.5220/0006210504870495>.
- [6] M. Sanchez, E. Exposito și J. Aguilar, „Industry 4.0: Survey from an Integration Perspective,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 33, nr. 10-11, pp. 1017-1041, 2020. ISSN: 1362-3052, doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1775295>.
- [7] V. Jirkovský, M. Obitko și V. Mařík, „Understanding Data Heterogeneity in the Context of Cyber-Physical Systems Integration,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, nr. 2, pp. 660-667, 2017. ISSN: 1941-0050, doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2596101>.
- [8] J. Bohuslava, J. Martin și H. Igor, „TCP/IP protocol utilisation in process of dynamic control of robotic cell according industry 4.0 concept,” în *IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, 2017. ISBN: 978-1-5090-5655-2, doi: <https://doi.org/10.1109/SAMI.2017.7880306>.
- [9] V. Román-Ibáñez, A. Jimeno-Morenilla și F. A. Pujol-López, „Distributed monitoring of heterogeneous robotic cells. A proposal for the footwear industry 4.0,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 31, nr. 2, pp. 1205-1219, 2018. ISSN: 1362-3052, doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1529432>.

-
- [10] N. Kang, C. Zhao, J. Li și J. A. Horst, „A Hierarchical structure of key performance indicators for operation management and continuous improvement in production systems,” *International Journal of Production Research*, vol. 54, nr. 21, pp. 6333-6350, 2016. ISSN: 1366-588X, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1136082>.
- [11] F. Orellana și R. Torres, „From legacy-based factories to smart factories level 2 according to the industry 4.0.,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 32, nr. 4-5, pp. 441-451, 2019. ISSN: 1362-3052, doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1609702>.
- [12] Z. Huang, H. Yu, Z. Peng și Y. Feng, „Planning community energy system in the industry 4.0 era: Achievements, challenges and a potential solution,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, nr. C, pp. 710-721, 2017. ISSN: 1879-0690, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.004>.
- [13] J. Nelles, S. Kuz, A. Mertens și C. Schlick, „Human-centered design of assistance systems for production planning and control. The role of the human in Industry 4.0,” în *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2016. ISBN: 978-1-4673-8075-1, doi: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2016.7475093>.
- [14] D. Romero, T. Wuest, J. Stahre și D. Gorecky, „Social Factory Architecture: Social Networking Services and Production Scenarios Through the Social Internet of Things, Services and People for the Social Operator 4.0.,” în *APMS 2017: Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, 2017. ISSN: 1868-4238, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_31.
- [15] A. Riel și M. Flatscher, „A Design Process Approach to Strategic Production Planning for Industry 4.0.,” în *EuroSPI 2017: Systems, Software and Services Process Improvement*, 2017. ISBN: 978-3-319-64217-8, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-64218-5_27.
- [16] F. Strozzi, C. Colicchia, A. Creazza și C. Noè, „Literature review on the ‘Smart Factory’ concept using bibliometric tools,” *International Journal of Production Research*, vol. 55, nr. 22, pp. 6572-6591, 2017. ISSN: 1366-588X, doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1326643>.
- [17] H. Liu, H. Ning, Q. Mu, Y. Zheng, J. Zeng, L. T. Yang, R. Huang și J. Ma, „A review of the smart world.,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 96, pp. 678-691, 2017. ISSN: 1872-7115, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.09.010>.
- [18] A. Syberfeldt, O. Danielsson și P. Gustavsson, „Augmented Reality Smart Glasses in the Smart Factory: Product Evaluation Guidelines and Review of Available Products,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9118-9130, 2017. ISSN: 2169-3536, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2703952>.
- [19] X. Li, D. Li, J. Wan, A. V. Vasilakos, C.-F. Lai și S. Wang, „A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0.,” *Wireless Networks*, vol. 23, nr. 1, pp. 23-41, 2017. ISSN: 1572-8196, doi: <https://doi.org/10.1007/s11276-015-1133-7>.

- [20] S. Zanero, „Cyber-Physical Systems,” *Computer*, vol. 50, nr. 4, pp. 14-16, 2017. ISSN: 1558-0814, doi: <https://doi.org/10.1109/MC.2017.105>.
- [21] J. Goossens și P. Richard, „Multiprocessor Real-Time Scheduling,” în *Cyber-Physical Systems: A Reference*, X. Wang, Ed., Berlin, Springer, 2017, pp. 1-33. ISBN: 978-3-642-54477-4, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54477-4>.
- [22] M. Qiu, S. Garg, R. Buyya, B. Yu și S. Hu, „Special Issue on Scalable Cyber-Physical Systems,” *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 103, nr. C, pp. 1-2, 2017. ISSN: 0743-7315, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2017.01.025>.
- [23] M. Elattar, V. Wendt și J. Jasperneite, „Communications for Cyber-Physical Systems,” în *Industrial Internet of Things*, Springer, 2017, pp. 347-372. ISBN: 978-3-319-42559-7, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7_13.
- [24] A. Napoleone, M. Macchi și A. Pozzetti, „A review on the characteristics of cyber physical systems for the future smart factories,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 54, pp. 305-355, 2020. ISSN: 1878-6642, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.007>.
- [25] O. Penas, R. Plateaux, S. Patalano și M. Hammadi, „Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems,” *Computers in Industry*, vol. 86, pp. 52-69, 2017. ISSN: 0166-3615, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.001>.
- [26] M. Tu, M. K. Lim și M.-F. Yang, „IoT-based production logistics and supply chain system – Part 2: IoT-based cyber-physical system: a framework and evaluation,” *Industrial Management & Data Systems*, vol. 118, nr. 1, pp. 96-125, 2018. ISSN: 0263-5577, doi: <https://doi.org/10.1108/IMDS-11-2016-0504>.
- [27] D. Sanderson, J. C. Chaplin și S. Ratchev, „Conceptual Framework for Ubiquitous Cyber-Physical Assembly Systems in Airframe Assembly,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, nr. 11, pp. 417-422, 2018. ISSN: 2405-8971, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.331>.
- [28] N.-H. Tran, H.-S. Park, Q.-V. Nguyen și T.-D. Hoang, „Development of a Smart Cyber-Physical Manufacturing System in the Industry 4.0 Context,” *Applied Sciences*, vol. 9, nr. 16, 2019. EISSN 2076-3417, doi: <https://doi.org/10.3390/app9163325>.
- [29] H. Panetto, B. Lung, D. Ivanov, G. Weichhart și X. Wang, „Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future.,” *Annual Reviews in Control*, vol. 47, pp. 200-213, 2019. ISSN: 1872-9088, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.02.002>.
- [30] M. Heiss, A. Oertl, M. Sturm, P. Palensky, S. Vielguth și F. Nadler, „Platforms for industrial cyber-physical systems integration: contradicting requirements as drivers for innovation,” în *2015 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, 2015. ISBN: 978-1-4799-7358-3, doi: <https://doi.org/10.1109/MSCPES.2015.7115405>.
- [31] J. Morgan și G. E. O'Donnell, „Enabling a ubiquitous and cloud manufacturing foundation with field-level service-oriented architecture,” *International Journal of*

- Computer Integrated Manufacturing*, vol. 30, nr. 4-5, pp. 442-458, 2017. ISSN: 1362-3052, doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1032355>.
- [32] E. Mezghani, E. Expósito și K. Drira, „A Model-Driven Methodology for the Design of Autonomic and Cognitive IoT-Based Systems: Application to Healthcare,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, vol. 1, nr. 3, pp. 224-234, 2017. ISSN: 2471-285X, doi: <https://doi.org/10.1109/TETCI.2017.2699218>.
- [33] F. Riggins și T. Keskin, „Introduction to Internet of Things: Providing Services Using Smart Devices, Wearables, and Quantified Self Minitrack,” în *50th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2017. ISSN: 2572-6862,
- [34] H. Gupta, A. V. Dastjerdi, S. K. Ghosh și R. Buyya, „FogSim: A Toolkit for Modeling and Simulation of Resource Management Techniques in Internet of Things, Edge and Fog Computing Environments,” *Software: Practice and Experience*, vol. 47, nr. 9, pp. 1275-1296, 2016. ISSN:1097-024X, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.02007>.
- [35] D. Lee, K. Choi și H. Kim, „Editorial: Smart Devices & Smart Spaces in Wireless Internet of Everything (Wireless-IoE),” *Wireless Personal Communications*, vol. 94, nr. 2, pp. 145-147, 2017. ISSN: 1572-834X, doi: <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4103-9>.
- [36] L. T. Yang, B. Di Martino și Q. Zhang, „Internet of Everything,” *Mobile Information Systems*, vol. 2017, pp. 1-3, 2017. ISSN: 1875-905X, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/8035421>.
- [37] S. F. Shaikh, M. T. Ghoneim, G. T. Sevilla, J. M. Nassar, A. M. Hussain și M. M. Hussain, „Freeform Compliant CMOS Electronic Systems for Internet of Everything Applications,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, nr. 5, pp. 1894-1905, 2017. ISSN: 1557-9646, doi: <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2642340>.
- [38] D. M. Shila, W. Shen, Y. Cheng, X. Tian și X. S. Shen, „AMCloud: Toward a Secure Autonomic Mobile Ad Hoc Cloud Computing System,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, nr. 2, pp. 74-81, 2017. ISSN: 1558-0687, doi: <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500119RP>.
- [39] L. M. Vaquero, L. Roderó-Merino, J. Caceres și M. Lindner, „A Break in the Clouds: Towards a Cloud Definition,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 39, nr. 1, pp. 50-55, 2008. ISSN:0146-4833, doi: <https://doi.org/10.1145/1496091.1496100>.
- [40] E. Exposito și C. Diop, *Smart SOA Platforms in Cloud Computing Architectures*, Wiley-ISTE, 2014. ISBN: 978-1-118-76169-4,
- [41] C. Perera, A. Zaslavsky, P. Christen și D. Georgakopoulos, „Sensing as a service model for smart cities supported by Internet of Things,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, nr. 1, pp. 81-93, 2014. ISSN: 2161-3915, doi: <https://doi.org/10.1002/ett.2704>.

- [42] A. Auger, E. Exposito și E. Lochin, „Survey on Quality of Observation within Sensor Web systems,” *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 7, nr. 6, pp. 163-177, 2017. ISSN:2043-6394, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-wss.2017.0008>.
- [43] I. Drăgan, T. Selea și T.-F. Fortiș, „Towards the Integration of a HPC Build System in the Cloud Ecosystem,” în *Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems. CISIS 2017*, 2017. ISBN: 978-3-319-61566-0, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61566-0_87.
- [44] M. Khan, X. Wu, X. Xu și W. Dou, „Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0,” în *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017. ISSN: 1938-1883, doi: <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996801>.
- [45] Directorate-General for Research and Innovation; Müller, J.; European Commission, „Enabling Technologies for Industry 5.0 : results of a workshop with Europe’s technology leaders,” Publications Office, 2020. ISBN: 978-92-76-22048-0, doi: <https://doi.org/10.2777/082634>.
- [46] Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L., Petridis, A.; European Commission, „ Industry 5.0 : towards a sustainable, human-centric and resilient European industry,” Publications Office of the European Union, 2021. ISBN: 978-92-76-25308-2, doi: <https://doi.org/10.2777/308407>.
- [47] Directorate-General for Research and Innovation, Renda, A., Schwaag Serger, S., Tataj, D., et al.; European Commission, „Industry 5.0, a transformative vision for Europe : governing systemic transformations towards a sustainable industry,” Publications Office of the European Union, 2022. ISBN: 978-92-76-43352-1, doi: <https://doi.org/10.2777/17322>.
- [48] F. Dragomir, E. Mincă, O. Dragomir și A. Filipescu, „Modelling and Control of Mechatronics Lines Served by Complex Autonomous Systems,” *Sensors*, vol. 19, nr. 15, 2019. EISSN 1424-8220, doi: <https://doi.org/10.3390/s19153266>.
- [49] E. Minca, A. Filipescu și A. Voda, „Modelling and control of an assembly/disassembly mechatronics line served by mobile robot with manipulator,” *Control Engineering Practice*, vol. 31, pp. 50-62, 2014. ISSN: 1873-6939, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.06.005>.
- [50] B. Zhang, L. Xu și J. Zhang, „Balancing and sequencing problem of mixed-model U-shaped robotic assembly line: Mathematical model and dragonfly algorithm based approach,” *Applied Soft Computing*, vol. 98, 2021. ISSN: 1872-9681, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106739>.
- [51] A. Filipescu, A. Filipescu, A. Voda și E. Minca, „Hybrid modeling, balancing and control of a mechatronics line served by two mobile robots,” în *2016 20th International conference on system theory, control and computing (ICSTCC)*, 2016. , ISBN: 978-1-5090-2720-0, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2016.7790671>
- [52] D. Kiran, „Chapter 24 - Sequencing and line balancing,” în *Production Planning and Control*, Butterworth-Heinemann, 2019, pp. 345-356. ISBN: 978-0-12-818364-9, doi: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03856-6>.

- [53] F. Defersha și F. Mohebalizadehgashti, „Simultaneous balancing, sequencing, and workstation planning for a mixed model manual assembly line using hybrid genetic algorithm,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 119, pp. 370-387, 2018. ISSN: 1879-0550, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.014>.
- [54] F. Pilati, G. Lelli, M. Faccio, M. Gamberi și A. Regattieri, „Assembly line balancing for personalized production,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, pp. 10261-10266, 2020. ISSN: 2405-8971, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2758>.
- [55] Z. A. Çil, Z. Li, S. Mete și E. Özceylan, „Mathematical model and bee algorithms for mixed-model assembly line balancing problem with physical human–robot collaboration,” *Applied Soft Computing*, vol. 93, 2020. ISSN: 1568-4946, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106394>.
- [56] S. Lapiere și A. Ruiz, „Balancing assembly lines: An industrial case study,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 55, pp. 598-597, 2004. EISSN: 14769360, doi: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601708>.
- [57] A. F. Kouedeu, J.-P. Kenné, P. Dejax, V. Songmene și V. Polotski, „Production and maintenance planning for a failure-prone deteriorating manufacturing system: a hierarchical control approach,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, pp. 1607-1619, 2015. ISSN :1433-3015, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6175-y>.
- [58] B. Zhang, L. Xu și J. Zhang, „A multi-objective cellular genetic algorithm for energy-oriented balancing and sequencing problem of mixed-model assembly line,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, 2020. ISSN: 1879-1786, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118845>.
- [59] T. Bartkowiak, M. Kaczmarek, A. Myszkowski și M. Pelic, „A design of an automated compact positioning system for workpiece positioning in machine too workspace,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 186-191, 2019. ISSN: 2212-8271, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.033>.
- [60] T. C. Lopes, A. S. Michels, C. G. Stall Sikora și L. Magatão, „Balancing and cyclical scheduling of asynchronous mixed-model assembly lines with parallel stations,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 50, pp. 193-200, 2019. ISSN: 1878-6642, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.01.001>.
- [61] A. S. Michels, T. C. Lopes, C. G. Stall Sikora și L. Magatão, „The Robotic Assembly Line Design (RALD) problem: Model and case studies with practical extensions,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 120, pp. 320-333, 2018. ISSN: 1879-0550, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.010>.
- [62] U. Özcan, „Balancing and scheduling tasks in parallel assembly lines with sequence-dependent setup times,” *International Journal of Production Economics*, vol. 213, pp. 81-96, 2019. ISSN: 1873-7579, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.023>.
- [63] T. C. Lopes, G. V. Pastre, A. S. Michels și L. Magatão, „Flexible multi-manned assembly line balancing problem: Model, heuristic procedure, and lower bounds for

- line length minimization,” *Omega*, vol. 95, 2020. ISSN: 0305-0483, doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.04.006>.
- [64] G. Süer, N. Almasarwah, O. Alhawari și C. Davis, „Multi-objective scheduling in labor-intensive manufacturing systems,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 57, pp. 469-483, 2020. ISSN: 1878-6642, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.014>.
- [65] O. Mohsen, Y. Mohamed și M. Al-Hussein, „A machine learning approach to predict production time using real-time RFID data in industrialized building construction,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 52, 2022. ISSN: 1474-0346, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101631>.
- [66] M. R. A. Atia, M. Mokhtar și J. Khalil, „An ANN parametric approach for the estimation of total production operation time,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, nr. 2, pp. 101579-101589, 2022. ISSN: 2090-4479, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.09.006>.
- [67] Y. Zhai, G. Xu și G. Huang, „Buffer space hedging enabled production time variation coordination in prefabricated construction,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, 2019. ISSN: 1879-0550, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106082>.
- [68] W. Chen, H. Liu și E. Qi, „Discrete event-driven model predictive control for real-time work-in-process optimization in serial production systems,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 55, pp. 132-142, 2020. ISSN: 1878-6642, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.03.002>.
- [69] T. S. Kuthambalayan și S. Bera, „Managing product variety with mixed make-to-stock/make-to-order production strategy and guaranteed delivery time under stochastic demand,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 147, 2020. ISSN: 1879-0550, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106603>.
- [70] A. Hübl, H. Jodlbauer și K. Altendorfer, „Influence of dispatching rules on average production lead time for multi-stage production systems,” *International Journal of Production Economics*, vol. 144, nr. 2, pp. 479-484, 2013. ISSN: 1873-7579, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.03.020>.
- [71] J. Remigio și C. Swartz, „Production scheduling in dynamic real-time optimization with closed-loop prediction,” *Journal of Process Control*, vol. 89, pp. 95-107, 2020. ISSN: 1873-2771, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procont.2020.03.009>.
- [72] K. Kanishka și B. Acherjee, „A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 89, pp. 220-283, 2023. ISSN: 1526-6125, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.034>.
- [73] S. Sahoo și C.-Y. Lo, „Smart manufacturing powered by recent technological advancements: A review,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 236-250, 2022. ISSN: 1878-6642, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.008>.

- [74] V. Alcácer și V. Cruz-Machado, „Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, nr. 3, pp. 899-919, 2019. ISSN: 2215-0986, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>.
- [75] L. Tiacci, „Mixed-model U-shaped assembly lines: Balancing and comparing with straight lines with buffers and parallel workstations,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 45, pp. 286-305, 2017. ISSN: 1878-6642, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.07.005>.
- [76] J. Morgan, M. Halton, Y. Qiao și J. Breslin, „Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 59, nr. ISSN: 1878-6642, pp. 481-506, 2021. , doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.001>.
- [77] Y. Tang, M. Dehaghani și G. G. Wang, „Review of transfer learning in modeling additive manufacturing processes,” *Additive Manufacturing*, vol. 61, 2023. ISSN: 2214-8604, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103357>.
- [78] B. Sobhani Aragh, E. Borzabadi Farahani, B. Xu, H. Ghasemnejad și M. W.J., „Manufacturable insight into modelling and design considerations in fibre-steered composite laminates: State of the art and perspective,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 379, 2021. ISSN: 1879-2138, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113752>.
- [79] A. Filipescu, G. Petrea, S. Filipescu și E. Minca, „Discrete modelling based control of a processing/reprocessing mechatronics line served by an autonomous robotic system,” în *4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, 2013. ISBN: 978-1-4799-2442-4, doi: <https://doi.org/10.1109/ISEEE.2013.6674360>.
- [80] A. Filipescu, D. Cernega, A. Filipescu, R. Solea și E. Minca, „SHPN models based simulation and control of mobile robotic systems integrated into A/DML,” în *21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2017. ISBN: 978-1-5386-3842-2, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2017.8107039>.
- [81] A. Filipescu, E. Minca și A. Filipescu, „Mechatronics Manufacturing Line with Integrated Autonomous Robots and Visual Servoing Systems,” în *IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, 2019. ISSN: 2326-8239, doi: <https://doi.org/10.1109/CIS-RAM47153.2019.9095848>.
- [82] „Universitatea "Dunărea de Jos" Galați (coordonator proiect complex); Univesitatea Valahia din Târgoviște (coorodnator proiect component); Universitatea Politehnica din București; Universitatea din Craiova,” 2018-2021.Cod Proiect: PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0290,
- [83] A. Filipescu, D. Ionescu, A. Filipescu, E. Mincă și G. Simion, „Multifunctional Technology of Flexible Manufacturing on a Mechatronics Line with IRM and CAS, Ready for Industry 4.0.,” *Processes*, vol. 9, nr. 5, 864, pp.1-25, 2021. EISSN 2227-9717, doi: <https://doi.org/10.3390/pr9050864>.

- [84] A. Filipescu, R. Solea, D. Cernega, A. Filipescu, G. Ciubucciu și G. Petrea, „SHPN modelling, visual servoing and control of WMR with RM integrated into P/RML,” în *21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2017. ISBN: 978-1-5386-3842-2, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2017.8107053>.
- [85] A. Filipescu, D. Cernega, A. Filipescu, R. Solea și E. Minca, „SHPN models based simulation and control of mobile robotic systems integrated into A/DML,” în *21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2017. ISBN: 978-1-5386-3842-2, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2017.8107039>.
- [86] A. Filipescu, E. Mincă, A. Filipescu și H.-G. Coandă, „Manufacturing Technology on a Mechatronics Line Assisted by Autonomous Robotic Systems, Robotic Manipulators and Visual Servoing Systems,” *Actuators*, vol. 9, nr. 4, 127, pp.1-22, 2020. EISSN 2076-0825, doi: <https://doi.org/10.3390/act9040127>.
- [87] O. A. Somefun, K. Akingbade și F. Dahunsi, „The dilemma of PID tuning,” *Annual Reviews in Control*, vol. 52, pp. 65-74, 2021. ISSN: 1872-9088, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.05.002>.
- [88] K. Lynch, N. Marchuk și M. L. Elwin, „PID Feedback Control,” în *Embedded Computing and Mechatronics with the PIC32*, Newnes, 2016, pp. 375-385. ISBN: 978-0-12-420165-1,
- [89] P. Shah și S. Agashe, „Review of fractional PID controller,” *Mechatronics*, vol. 38, pp. 29-41, 2016. ISSN: 1873-4006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.06.005>.
- [90] S. B. Joseph, E. G. Dada, A. Abidemi, D. O. Oyewola și B. Khammas, „Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: review, approaches and open problems,” *Heliyon*, vol. 8, nr. 5, 2022. ISSN: 2405-8440, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>.
- [91] N. P. Lawrence, G. E. Stewart, P. Loewen, M. Forbes, J. Backstrom și R. Gopaluni, „Optimal PID and Antiwindup Control Design as a Reinforcement Learning Problem,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, nr. 2, pp. 236-241, 2020. ISSN: 2405-8971, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.129>.
- [92] D. Ma, I. Boussaada, J. Chen, C. Bonnet, S.-I. Niculescu și Chen, „PID control design for first-order delay systems via MID pole placement: Performance vs. robustness,” *Automatica*, vol. 137, 2022. ISSN: 0005-1098, doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.110102>.
- [93] O. Garpinger, T. Häggglund și K. J. Åström, „Performance and robustness trade-offs in PID control,” *Journal of Process Control*, vol. 24, nr. 5, pp. 568-577, 2014. ISSN: 1873-2771, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procont.2014.02.020>.
- [94] A. Tahoun, „Anti-windup adaptive PID control design for a class of uncertain chaotic systems with input saturation,” *ISA Transactions*, vol. 66, pp. 176-184, 2017. ISSN: 0019-0578, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.10.002>.

- [95] K.-E. Åarzen, „Simple Event-Based PID Controller,” *14th IFAC World Congress*, pp. 8687-8692, 1999. ISBN: 0 08 043248 4, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)57482-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)57482-0).
- [96] Y. Yang, K. Cui, D. Shi, G. Mustafa și J. Wang, „PID control with PID event triggers: Theoretic analysis and experimental results,” *Control Engineering Practice*, vol. 128, 2022. ISSN: 1873-6939, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105322>.
- [97] S. Du, Q. Yan, J. Qiao, „Event-triggered PID control for waste water treatment plants,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 38, 2020. ISSN: 2214-7144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101659>.
- [98] E. Mincă, A. Filipescu, D. Cernega, R. Șolea, A. Filipescu, D. Ionescu și G. Simion, „Digital Twin for a Multifunctional Technology of Flexible Assembly on a Mechatronics Line with Integrated Robotic Systems and Mobile Visual Sensor—Challenges towards Industry 5.0,” *Sensors*, vol. 22, nr. 21, 8153, pp. 1-35, 2022. ISSN 1424-8220, doi: <https://doi.org/10.3390/s22218153>.
- [99] „Simulateur de Réseaux de Petri discret, Hybrides et Continus.,” [Interactiv]. Available: <http://web.archive.org/web/20101024230923/http://www.laq.ensieg.inpg.fr/sirphyco/>. [Accesat 06 04 2023].
- [100] „MathWorks,” [Interactiv]. Available: <https://www.mathworks.com/>. [Accesat 06 04 2023].
- [101] „Visual Studio 2022 Community Edition,” [Interactiv]. Available: <https://visualstudio.microsoft.com/vs/community/>. [Accesat 06 04 2023].
- [102] „TIA Portal - Automatizări industriale - Romania,” Siemens, [Interactiv]. Available: <https://www.siemens.com/ro/ro/products/automatizari/tia-portal.html>. [Accesat 06 04 2023].
- [103] „SOLIDWORKS,” [Interactiv]. Available: <https://www.solidworks.com/>. [Accesat 06 04 2023].