



**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ de ȘTIINȚĂ și TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI**

**ȘCOALA DOCTORALĂ
Inginerie Industrială și Robotică**

TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETĂRI PRIVIND STRATEGIA PROCESELOR
INDUSTRIALE INTEGRATE INFORMATIC**

REZUMAT

Conducător doctorat

Prof.univ. **OPRAN Constantin Gheorghe**

Doctorand

IONEL Dănuț-Sorin

Cuprins

Abrevieri și notații.....	3
Introducere	4
1. Stadiul actual al sistemului de fabricație.....	5
1.1. Evoluția istorică a sistemelor de fabricație.....	5
1.2. Automatizarea industrială. Sisteme de fabricație inteligente	5
1.3. Sistemul holonic al fabricației integrate informatic.....	6
1.4. Tehnologii avansate de fabricație	6
1.5. Implementarea tehnologiilor avansate de fabricație	7
1.6. Realizarea sistemelor de producție informatice integrate	7
1.7. Algoritmi	8
1.8. Sisteme de producție adaptabile 4.0 (Lean 4.0)	9
1.9. Concluzii stadiul actual al sistemului de fabricație.....	10
2. Obiectivele de cercetare ale tezei de doctorat și metodologia de cercetare.....	11
2.1. Obiective de cercetare.....	11
2.2. Metodologia	12
3. Contribuții privind strategia de realizare a unui sistem de fabricație integrat informatic.....	12
3.1. Integrarea informatică a sistemului de fabricație	12
3.1.1. Realizarea subsistemului cibernetic de fabricație.....	13
3.1.2. Definierea copiei digitale a sistemului de fabricație.....	14
3.1.3. Definierea subsistemului cibernetic sincron proceselor de fabricație	15
3.1.4. Definierea subsistemului cibernetic asincron proceselor de fabricație	15
3.1.5. Realizarea subsistemului informatic	16
3.1.6. Rețeaua informatică a sistemului sincron proceselor de fabricație.....	16
3.1.7. Rețeaua informatică a subsistemului cibernetic asincron	16
3.2. Sistemul de Baze de Date Integrate Informatic.....	17
3.2.1. Subsistemul de Baze de Date ale Resurselor de Fabricație	17
3.2.2. Subsistemul de Baze de Date ale Proceselor de Fabricație	18
3.2.3. Subsistemul de Baze de Date ale Produselor Fabricate.....	18
3.2.4. Managementul Sistemului de Baze de Date Integrate Informatic	18
3.3. Sistemul de Management al Fabricației Integrate Informatic.....	19
3.3.1. Dezvoltatorul de aplicații de administrare a obiectelor	19
3.3.2. Configuratorul sistemului informatic și de comunicații	20
3.3.3. Integratorul sistemului cyber-fizic.....	20
3.3.4. Managerul de fabricație	20
3.4. Sistemul de Control Predictiv Integrat Informatic.....	21
3.5. Cercetări privind controlul predictiv pentru tehnologia de injecție cu reacție în matriță ...	22
3.5.1. Strategia de implementare a sistemului de control predictiv	26
3.6. Strategia de integrare informatică a sistemului de fabricație adaptabil.....	28
3.6.1. Strategia de realizare a instrumentului Poka-Yoke.....	28
3.6.2. Strategia de aplicare a principiilor Lean Management	29
4. Concluzii privind strategia proceselor industriale integrate informatic.....	30
5. Contribuții originale.....	32
6. Direcții de cercetare.....	33
Bibliografie	34
Listă lucrări publicate.....	43

Abrevieri și notații

AAS – Asset Administration Shell

AIAL – Aplicația informatică de administrare a instrumentului Lean

AIAO – Aplicația informatică de administrare a obiectelor

AIAOC – Aplicația informatică de administrare a obiectelor complexe

BDRT – Baza de date în timp real

CPS / CPMS – Cyber-Physical System / Cyber-Physical Manufacturing System

CPSL – Cyber-Physical System Lean

DMC – Dynamic Matrix Control

ERP – Enterprise Resources Planning

HCF – Holon Cyber Fizic

HMI – Human Machine Interface

IoT / IioT – Internet of Things / Industrial Internet of Things

IRDI – International Registration Data Identifier

ISO – International Organization for Standardization

MaaS – Manufacturing as a Service

MAIAL – Meta aplicație informatică de administrare a sistemului de fabricație adaptabil integrat informatic

MES – Manufacturing Execution System

MPC – Model Predictive Control

PaaS – Platform as a Service

PLC – Programmable Logic Controller

RAMI 4.0 – Reference Architecture Model Industry 4.0

RISA – Rețeaua Informatică a Subsistemului Cibernetic Asincron Proceselor de Fabricație

RISS – Rețeaua informatică a Subsistemului Cibernetic Sincron Proceselor de Fabricație

RTLS – Real-Time Location System

SaaS – Software as a Service

SBDF – Subsistemul de Baze de Date ale Produselor Fabricate

SBDI – Sistemul de Baze de Date Integrate

SBDP – Subsistemul de Baze de Date ale Proceselor de Fabricație

SBDR – Subsistemul de Baze de Date ale Resurselor de Fabricație

URI – Uniform Resource Identifier

XaaS – Everything as a Service

Introducere

Sistemele de producție industrială se află sub presiunea continuă a modificărilor mediului economic, aflat într-o dinamică continuă datorită solicitărilor și exigențelor din ce în ce mai mari legate de preturi, calitatea produselor și acoperirea unor nevoi specifice ale consumatorilor. Aceste presiuni sunt transferate în cea mai mare parte subsistemelor proprii de fabricație sub forma unor seturi de cerințe de optimizare, de creștere a flexibilității și de reducere a variabilității, cu scopul de a mări agilitatea întregului sistem și de a asigura o prezență cu eficiență economică crescută pe piață.

Intervențiile sistemului decizional și susținerea acordată proiectelor de transformare-inovare ca urmare a adoptării unor noi abordări sau filosofii de fabricație au condus la evoluții semnificative ale sistemelor industriale automatizate de fabricație (flexibilă, programabilă, robotizată sau colaborativă). În ultimii ani, dezvoltarea tehnologiilor consacrate și apariția de noi tehnologii (de fabricație, de comunicații și prelucrare a informațiilor) au atras atenția și, prin adoptarea acestora, au fost percepute ca soluții pentru realizarea fabricației agile, flexibile sau suple. Caracteristica acestui sistem este sensibilitatea față de factorii externi și interni și se datorează posibilității de integrare într-un ecosistem în care părțile se află în interacțiune și acționează conform unui set de obiective comun.

Procesul de fabricație integrat informatic este strâns legat de cele mai noi și avansate concepte, cum ar fi fabricația inteligentă, fabricația distribuită sau personalizarea în masă.

Noua paradigmă a sistemului de producție se bazează pe avantajele oferite de accesibilitatea calculatoarelor cu putere mare de calcul, a performanței sistemelor de comunicații în rețea, a creșterii spectaculoase a spațiilor de stocare de tip cloud și a creșterii capacității sistemelor informatice de modelare și randare în timp real. La acestea s-au adăugat disponibilitatea serviciilor cloud, care au devenit mult mai fiabile și scalabile, servicii care au devenit o resursă indispensabilă sistemelor de producție integrate informatic și care oferă performanțe înalte pentru un cost mic. Posibilitatea de a integra informatic sistemul de producție, sistemul de fabricație dar și procesele de fabricație derulate a condus la apariția unui nou concept, numit Industria 4.0 sau a patra revoluție industrială. Acest concept descrie un sistem de producție autonom, eficient, concretizat sub forma unei fabrici inteligente, în care oameni, resurse și mașini comunică și colaborează pentru realizarea de produse ca rezultat al aplicării proceselor inteligente de fabricație, integrate lanțului valoric.

Prin contribuțiile incluse, această teză oferă o soluție completă de integrare informatică a procesului industrial de fabricație automatizat. Această soluție este dezvoltată sub forma unei strategii care abordează procesul de transformare tehnologică, care are ca obiectiv integrarea informatică a proceselor industriale și realizarea sistemului de fabricație cyber-fizic.

1. Stadiul actual al sistemului de fabricație

1.1. Evoluția istorică a sistemelor de fabricație

Termenul sistem de fabricație a fost introdus în secolul XIX cu înțelesul de sistem de fabrică (33), descris prin efortul făcut pentru optimizarea producției ca un întreg, simplificarea și optimizarea acestuia ca sistem (34). Sistemul de fabricație este descris ca un ansamblu de construcții, utilaje, mașini, dispozitive și lucrători, prin intermediul cărora se transformă materia primă în bunuri (2). Prima paradigmă care influențat evoluția sistemelor de fabricație a fost producția de masă și a avut ca obiectiv realizarea unui produs în volum mare, la calitatea cerută și la un cost eficient. Odată cu apariția programatorului logic se dezvoltă controlul asupra proceselor, organizării și eficienței producției și apare un nou concept industrial sub numele de sistem flexibil de fabricație. Evoluția tehnologiei și sistemelor informaționale în domeniul tehnologiilor de producție a condus la apariția unui nou concept, de fabricație inteligentă, prin care utilizarea cunoștințelor existente conduce la crearea unei noi cunoașteri (6).

1.2. Automatizarea industrială. Sisteme de fabricație inteligente

Automatizarea face referire la controlul proceselor industriale și a mașinilor prin încorporarea unor dispozitive de comandă și control. Arhitectura sistemului de fabricație automatizat se prezintă sub formă ierarhizată: nivelul de detecție, nivelul secțiilor de fabricație, nivelul de automatizare al unității de producție și nivelul întreprinderii – permite derularea activităților de management ale sistemul automatizat (37).

Pentru a accesa un nivel de inteligență, subsistemele sunt echipate cu extensii care pot interacționa sau pot comunica cu mediul, cu oameni sau cu alte subsisteme, oferind informații despre starea sistemului, subsistemului sau procesului supravegheat. De asemenea, permite creșterea nivelului de automatizare și inteligenței mașinilor, precum și introducerea roboticii în procesele industriale (32).

Smart Manufacturing este un concept integrator, care abordează sistemul de fabricație ca centru de inovare profitabil prin integrarea automatizării industriale cu tehnologiile avansate de fabricație. Tehnologiile și standardele care stau la baza noului nivel al fabricației inteligente sunt mașinile inteligente și roboții industriali, Internetul Industrial al Obiectelor, serviciile Cloud, platforme integrate de gestionare a sistemului de fabricație, Big Data (30) (vezi Fig. 1.1).

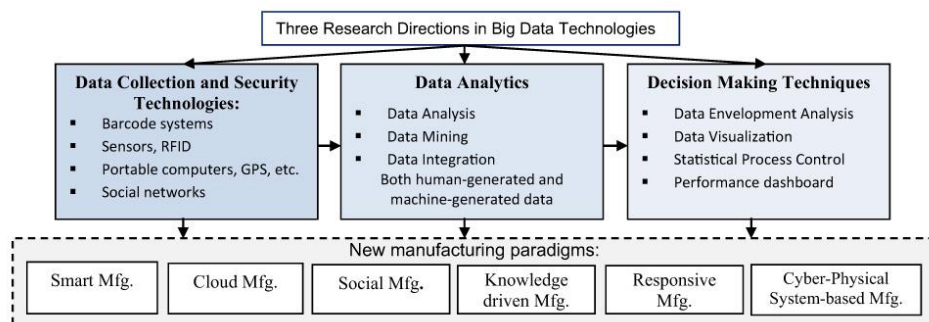


Fig. 1.1: Legătura dintre tehnologiile fabricației inteligente și noile concepte de fabricație (41)

Conform acestui concept, tehnologiile sunt implicate în controlul și gestionarea inteligentă a resurselor, care sunt virtualizate și orientate către prestarea de servicii (31). Această oportunitate a fost sesizată de Asociația Producătorilor de Echipamente Electrice și Electronice din Germania care a definit un nou concept, Industrie 4.0, și pentru care a elaborat modelul de referință RAMI 4.0 (42).

Conceptul Industrie 4.0 a fost definit ca următoarea etapă de evoluție a fabricației inteligente, este paradigma unei noi etape a industrializării și este un sistem de producție integrat informatic, inteligent, în care produsele și serviciile asociate sunt conectate, permite realizarea unei producții complet automatizate, digitalizate și autoconfigurabile, ale cărui elemente sunt autonome (20), iar sistemul cyber fizic monitorizează procesele fabricii inteligente, creează o copie virtuală a sistemului fizic de producție, pentru care formulează decizii descentralizate, comunică și cooperează cu sistemul fizic (21).

Obiectivele principale ale acestui sistem de producție este de a integra pe orizontală rețeaua sistemelor de producție în care este creată valoarea, de a integra vertical sistemele de fabricație proprii și a subsistemelor asociate creării valorii, precum și integrarea ciclului de viață al produsului, de la gestionarea materiei prime, până la consumul acestuia și scoaterea din uz (51). Pentru a deveni aplicabil, sistemul de producție integrat informatic trebuie să definească fiecare componentă a sa la nivel digital sub forma unei aplicații informatice care include date de administrare. (52).

1.3. Sistemul holonic al fabricației integrate informatic

Sistemul holonic al fabricației integrate informatic este alcătuit din totalitatea holoarhiilor cyber-fizice realizate ca urmare a virtualizării entităților sistemului fizic de fabricație cu scopul de a accesa și distribui inteligența, precum și de a integra capacități de învățare în vederea realizării sistemului de fabricație adaptabil și evolutiv (55). Holonul de fabricație este o structură autonomă și cooperantă al unui sistem de fabricație, concepută pentru transformarea, transportul și stocarea obiectelor fizice sau informaționale. Un holon poate fi format din alți holoni, formând un sistem holonic (holoarhie) care cooperează pentru a atinge un scop sau obiectiv de fabricație și care poate fi creat sau dizolvat dinamic, în funcție de nevoile procesului de fabricație (55). Sistemul de fabricație holonic agil este reconfigurabil, dinamic, scalabil (poate integra holoni de fabricație noi) și procesează intensiv informația (56).

1.4. Tehnologii avansate de fabricație

Tehnologiile avansate oferă posibilitatea de a transforma sistemul existent într-un sistem integrat informatic și permit actualizarea acestui sistem ca urmare a dezvoltărilor tehnologice, încorporarea inovației sau de noi tehnologii la nivelul operațiunilor de bază sau complementare (19). Acestea sunt clasificate și analizate în funcție de tipul de implementare, zona operațională sau nivelul organizațional deservit, modalitatea de integrare sau capacitățile intrinseci de procesare a informației (26) (27). Tehnologiile avansate utilizate în transformarea sistemelor de fabricație prin integrare informatică sunt fabricare aditivă, bazele de date mari, tehnologia materialelor avansate, robotica avansată, inteligența artificială, biotehnologia și biofabricația, rețelele informatice personalizate (Blockchain), securitate cibernetică, tehnologiile DDSI (Proiectare/Simulare/Integrare digitală), sisteme de calcul de înaltă performanță, interfețe inteligente, Internetul obiectelor (Internet of Things / IoT) (19).

1.5. Implementarea tehnologiilor avansate de fabricație

Tehnologia este o aplicație a unor cunoștințe noi asupra unor aspecte practice, acumulate prin aplicarea științei, care are ca scop cunoașterea prin observație și căutarea adevărului (94). Tehnologiile avansate de fabricație sunt împărțite în echipamente sau extensii informatice și de calcul (hardware – rețele, calculatoare, interfețe, instrumente, senzori s.a.), programe și aplicații software (CAD, CAM, Computer Aided Process Planning, Data Base Management System, Material Requirements Planning, Manufacturing Resource Planning, Supervisory Control & Acquisition Data s.a.) și echipamente de fabricație (Programmable Logic Control Machines or Processes, Materials Working Lasses, Robots with Sensing Capabilities, Robots w/o Sensing Capabilities, Rapid Prototyping Systems, High Speed Machining, Flexible Manufacturing Cells, Automatic Assembly, Automated Warehousing/Order Picking s.a.) (60). Aceste tehnologii pot fi aplicate individual (CAD, CAPP), ca soluții tehnologice (de exemplu Automated Guided Vehicles System, AVGS) sau ca sisteme tehnologice integrate (sistem de fabricație flexibil, Computer Integrated Manufacturing) (9) (95).

Tehnologiile care permit realizarea sistemului de producție informatic integrat se împart în două categorii: tehnologii de bază (care permit conectivitatea și aplicarea capacităților tehnologiilor suport) și tehnologii suport (care asigură transformarea subsistemelor fizice în subsisteme inteligente) (16).

Pentru a fi inteligent, sistemul trebuie să intervină asupra fluxului de informații dintre elementele care interpretează mediul și elementele care reacționează la modificările sesizate din mediu, și să fie capabil să introducă ajustările necesare sistemului, adică să aibă proprietăți cognitive (97). Intervenția modelului cognitiv de interpretare a informației în structura fluxului informațional și conectarea cu celelalte subsisteme permite realizarea unui sistem de producție inteligent și autoadaptabil (98).

1.6. Realizarea sistemelor de producție informatice integrate

Sistemele cyber-fizice pot fi interconectate și pot folosi informațiile puse la dispoziție de alte elemente, asociate sistemului de producție. Pentru a comunica într-un format recunoscut de toate platformele, elementele digitalizate ale sistemului trebuie definite conform standardelor. Aceste elemente sunt definite și incluse sistemului cyber-fizic prin aplicația informatică de administrare a obiectelor (AIAO) (99), o reprezentare digitală, standardizată, a unui obiect fizic sau logic a unui sistem de producție. Include eticheta de administrare, obiectul reprezentat, diferite modele digitale ale obiectului (submodele) și descrierea funcționalității tehnice a acestuia (100).

Implementarea acestor aplicații de administrare se realizează la nivelul unui concept de operare standardizat care descrie comportamentul modulelor de operare predefinite (101). La nivelul aplicației de administrare, definițiile includ caracteristicile, funcționalitățile și referințele tip, atât asociate intern fiecărui activ (aplicații software de dezvoltare, extensii încorporate etc) cât și externe, de utilizare și întreținere (capacitate de producție, fișe tehnice, informații de marketing, procesul de achiziție al serviciului asociat s.a.) (23). Prin digitalizare, componentele devin disponibile, interoperabile și pot fi integrate în sisteme autonome sau pot deveni subiecte ale inteligenței artificiale (103). Informațiile

incluse sunt standardizate, interpretabile și fac referire la toate aspectele legate de funcționalitatea activului fizic reprezentat. Aceste descrieri sunt individualizate sub formă de submodele - secvențe de cod structurate, descriptive, prin care este realizată reprezentarea (105).

Odată realizate AIAO a resurselor de fabricație, este realizată copia digitală a sistemului de fabricație și sistemul CPS prin maparea submodelelor implicate în procesul de producție. După mapare, meta-AIAO este compilat într-o aplicație executabilă care va fi aplicată pentru derularea procesului de fabricație, conform scenariului (106).

1.7. Algoritmi

La nivelul actual al sistemelor de fabricație înalt automatizate sunt adoptate soluții eficiente, bazate pe procesarea și utilizarea informației. O soluție prezintă un algoritm (o sarcină complexă) aplicat unui model matematic al sistemului, care descrie problema de rezolvat (planificare, programare sau secvențiere a producției). Aceste modele pot fi conceptuale, analitice, de inteligență artificială sau simulare, care abordează tipul problemei de rezolvat, obiectivele de fabricație, dimensiunea loturilor de produse, constrângerile legate de resursele de fabricație, modelul sistemului de fabricație, instrumentul de dezvoltare (128). Aceste aplicații sunt denumite algoritmi, care sunt clasificați în algoritmi de optimizare – asigură cea mai bună soluție posibilă, euristici – asigură o soluție optimă, practică și suficientă, metaeuristici – asigură o soluție de nivel superior, într-un proces iterativ și algoritmi matematici – o combinație între algoritmi euristici și metode de optimizare (129)

Modelul de control predictiv cunoaște o largă implementare în domeniul ingineriei de control al fabricație automatizate, este un model multivariabil care utilizează parametri de performanță ai sistemului de control (134). Rezultatul programării algoritmului este un controler care utilizează un model matematic de reprezentare a procesului pentru a prezice rezultatul derulării acestuia la momente viitoare de timp (orizont de predicție) și care aplică o secvență de control pentru minimizarea funcției obiectiv și pentru diminuarea variabilității (135). Este o tehnică de control prin feedback pentru optimizarea proceselor, planificării operaționale și a resurselor, în timp real (136). Structura algoritmului de control predictiv (MPC – Model Predictive Control) este formată din modelul de predicție (cum se determină ceea ce s-ar putea întâmpla), funcția obiectiv (instrumentul de măsurare și evaluare) și funcția de control (implementarea controlului) (135).

Obiectivul modelului este de a realiza cea mai bună predicție a comportamentului procesului pentru următoarea instanță: $\hat{y}(t+k / t)$ (135).

Prin modelarea SSM se realizează o reprezentare matematică a sistemului fizic de fabricație, prin intermediul unui set de variabile de intrări și ieșiri, și a unui set de variabile de stare. Reprezentarea folosește două ecuații de stare (134):

$$\begin{aligned} x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m u(k) + B_d \omega(k) & (1) \\ y(k) &= C_m x_m(k) \end{aligned}$$

Modelul de control predictiv este un algoritm care utilizează un model de proces pentru a calcula o variabilă manipulată cu scopul de a optimiza și prezice evoluția unui obiectiv de performanță pentru o perioadă de timp, ținând seama de un set de constrângeri (limite) ale variabilelor de intrare și ale procesului (134). Variabilele de stare a sistemului se pot defini ca o sumă a efectelor variabilelor de intrare și de ieșire asupra stării sistemului, de forma (134):

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^m b_i u(k-i) \quad (2)$$

În acest fel se obține un model matematic concis al sistemului, pentru care sunt determinați coeficienții necesari descrierii sistemului, model la care se aplică o funcție de transfer pentru a obține modelul spațiului de stare discret, prin aplicarea unei funcții de transfer (137). În acest fel, se determină funcția de transfer ca raport între variabilele de ieșire și variabilele de intrare transformate (134).

Următorul pas este proiectarea unei matrice dinamice de control (DMC – Dynamic Matrix Control) care să permită realizarea de predicții a evoluției comportamentului sistemului, în orizontul de timp ales (pentru numărul de pași stabilit). Prin definirea acestei matrice, se pot efectua calculele necesare pentru determinarea evoluției variabilelor, iar rezultatele sunt implementate la nivelul sistemului pentru actualizarea stării interne și realizarea stării de echilibru (138). Pentru fiecare pas (k) al procesului, algoritmul DMC preia informațiile care descriu efectele comportamentului din trecut și calculează valorile următoarei instanțe $Y(k+1/k)$ pentru orizontul de control al modelului, în limita orizontului optim de realizare a predicției (138). De asemenea, valorile de referință sunt calculate conform unui model staționar al procesului, iar optimizarea punctului de referință se face prin determinarea valorilor optime a vectorilor variabilelor de comandă și control u_{sp} și y_{sp} și a funcției obiectiv (137):

$$\min_{u_{sp}, y_{sp}} J_s = c^T u_{sp} + d^T y_{sp} + e_y^T Q_{sp} e_y + e_u^T R_{sp} e_u + C^T T_{sp} C \quad (8)$$

1.8. Sisteme de producție adaptabile 4.0 (Lean 4.0)

Conceptul Lean este văzut ca o soluție pentru reducerea complexității sistemelor de producție automatizate (140). Una dintre ultimele dezvoltări este automatizarea adaptabilă (Lean Automation) care oferă perspectiva integrării conceptului Industrie 4.0 la nivelul unui sistem de producție adaptabil și sugerează automatizarea proceselor repetitive care generează valoare (141). De asemenea, sunt puncte de vedere care consideră că Industria 4.0 este următorul stadiu evolutiv al sistemului de producție adaptabil (142) prin gestionarea fluxului de producție sau a proceselor de întreținere predictivă (143), iar adoptarea tehnologiilor Industriei 4.0 permite organizarea și reorganizarea rapidă a spațiilor de fabricație conform fluxului, volumelor sau mixului de produse fabricate (144).

În conceptul Industrie 4.0 s-au identificat un set de tehnologii fundamentale prin care sunt identificate și gestionate sau eliminate aceste pierderi (145).

În raport cu cerințele fabricației integrate informatic, care este bazată pe încorporarea tehnologiilor avansate de fabricație, fabricația adaptabilă este considerată un sistem lent, cu aplicabilitate limitată în

cea ce privește flexibilizarea proceselor, producția în loturi mici sau reacția rapidă a sistemului, însă avantajele oferite de fabricația adaptabilă mobilizează eforturile pentru identificarea de soluții pentru integrarea acestor valori sistemelor autonome și flexibile de fabricație (28).

Stadiul actual subliniază posibilitatea de utilizare a tehnologiilor avansate pentru implementarea instrumentelor și practicilor fabricației adaptabile în contextul fabricației integrate informatic, pentru fiecare instrument Lean 4.0 identificându-se mai multe tehnologii care pot oferi suport pentru integrare (vezi Fig. 1.2) (28).

LM TOOL	TECHNOLOGIES 4.0						
	Big Data Analytics	AGVs	AM	The Cloud	Cybersecurity	VS	AR
JIT	X	X	X	X			X
Kanban	X	X				X	
Poka-Yoke		X		X	X		X
VSM	X			X		X	
Kaizen	X			X		X	X
TPM	X	X	X	X		X	X

Fig. 1.2 Fabricației adaptabile în sistemul de fabricație integrat informatic (28)

Aplicabilitatea conceptului fabricației integrate informatic se bazează pe culegerea și procesarea datelor. Sistemul de management al fabricației adaptabile 4.0 este un model integrativ între conceptul de fabricație integrată informatic și principiile fabricație adaptabile, din care rezultă un sistem inteligent, flexibil și reconfigurabil care respectă criteriile sistemelor avansate de fabricație Industrie 4.0 (154).

1.9. Concluzii stadiul actual al sistemului de fabricație

Evoluția tehnologiei informației a condus la apariția conceptului de fabricație inteligentă. Noile tehnologii au impus redefinirea sistemului de fabricație prin noul concept Smart Manufacturing, care abordează integrarea automatizării industriale și devine platformă pentru concepte noi, cum ar fi Industria 4.0, fabricația virtuală sau Cloud Manufacturing.

Conceptul Industrie 4.0 a fost definit ca următoarea etapă de evoluție a fabricației inteligente, fiind considerat o nouă etapă a industrializării. Industria 4.0 descrie un sistem de producție integrat informatic, inteligent, în care produsele și serviciile asociate sunt conectate, iar mediul sistemului permite realizarea unei producții complet automatizate, digitalizată și autoconfigurabilă, în care lanțul valoric se prezintă sub forma unei rețele descentralizate ale cărui elemente sunt autonome.

Stadiul cercetărilor reliefează atenția acordată realizării flexibilității, scalabilității și adaptabilității întregului sistem prin identificarea resurselor fizice, cibernetice și a capacităților necesare pentru îndeplinirea obiectivelor de producție, precum și a serviciilor atașate acestora.

În conceptul Industrie 4.0 s-au identificat un set de tehnologii fundamentale prin care sunt identificate și gestionate sau eliminate aceste pierderi, iar tehnologiile care stau la baza sistemului

Industria 4.0. Strategiile de transformare trebuie să țină seama de tipul tehnologiilor adoptate, intervenind prin actualizarea proceselor tehnologice sau transformând modelul de afaceri. Obiectivul acestor strategii este de a concretiza produsul inteligent, a muncii inteligente, fabricației inteligente și a canalului de aprovizionare inteligent.

Pentru realizarea sistemului de producție informatic integrat, strategia stabilește mixul tehnologiilor aplicabile sistemului de producție existent. Acest mix este format din tehnologiile de bază (care permit conectivitatea și susținerea tehnologiilor suport) și tehnologiile suport (care pun la dispoziția sistemului capacitățile necesare transformării sistemelor fizice în subsisteme inteligente).

Implementarea strategiei tehnologice trebuie să conducă sistemul de producție la nivel cognitiv - să aibe capacitatea de a interpreta mediul și de a reacționa la modificări prin ajustări ale proceselor și acțiunilor, prin redefinirea sistemului de obiective de funcționare și modificarea comportamentului. Aceasta îi va oferi capacități de autocontrol, autooptimizare și autoadaptabilitate.

Noua arhitectură a subsistemului fizic de fabricație permite conectarea și integrarea cu sistemul cibernetic și este specifică sistemelor holonice, prin care sunt asamblate sau dezasamblate configurații ale celulelor de fabricație sau a întregului sistem.

Implementarea unui algoritm permite digitalizarea componentelor sistemului de fabricație integrat informatic. Alegerea tipului de algoritm se sprijină pe tehnologiile avansate de fabricație pe care sistemul le încorporează. Modelul de control predictiv este multivariabil, utilizează parametri de performanță ai sistemului de control, gestionează constrângerile, efectuează optimizări și gestionează procese în timp real. Modelul MPC se bazează pe modelarea matematică a sistemului vizat, ceea ce permite efectuarea de calcule de performanță complexe, care au ca rezultat determinarea unei secvențe de control aplicabilă sistemului gestionat și predicția evoluției comportamentului viitor al acestuia.

2. Obiectivele de cercetare ale tezei de doctorat și metodologia de cercetare

2.1. Obiective de cercetare

- O1. Identificarea unei strategii de integrare informatică a unui sistem de fabricație.
- O2. Definirea unei structuri integrate de gestionare și analiză a datelor, conform conceptului de fabricație integrată informatic.
- O3. Stabilirea arhitecturii unui sistem de management inteligent interconectat pentru sistemul de fabricație integrat informatic.
- O4. Identificarea și proiectarea unui algoritm care să permită integrarea cibernetică și gestionarea activelor, conform conceptului de fabricație integrată informatic.
- O5. Identificarea unei strategii pentru implementarea sistemului de fabricație adaptabilă integrată informatic.

2.2. Metodologia

Metodologia activității pentru derularea cercetărilor necesare pentru îndeplinirea obiectivelor a urmărit parcurgerea următoarelor etape:

E1. Identificarea unei strategii de integrare informatică a unui sistem de fabricație a constat în studierea stadiului actual al cercetărilor și evaluarea diferitelor direcții științifice de abordare a tratării componentelor sistemelor cyber fizice, din perspectiva integrării informatice.

E2. Pentru definirea structurilor integrate de gestionare și analiză a datelor au fost studiate realizările științifice din domeniul arhitecturii și managementului bazelor de date, a gestionării și analizei administrării informației în sistemele de fabricație, precum și evaluarea direcțiilor de cercetare a utilizării bazelor de date mari în sistemele integrate informatic.

E3. În vederea stabilirii arhitecturii sistemului de management inteligent interconectat s-au identificat și analizat stadiul actual al direcțiilor de cercetare privind managementul sistemelor de fabricație automatizate, a tehnologiilor de integrare și modelele de arhitectură propuse în cadrul conceptual al sistemelor de fabricație integrate informatic.

E4. Pentru identificarea și proiectarea unui algoritm prin care să se realizeze administrarea la nivel cibernetic a activelor sistemelor de fabricație, s-a studiat stadiul actual al cercetărilor pentru identificarea unei soluții adecvate sistemelor de fabricație autohtone și s-a realizat o aplicație în baza soluției selectate.

E5. Pentru identificarea strategiei de implementare a sistemului de fabricație adaptabilă integrată informatic a fost studiat stadiul actual al cercetărilor cu privire la conceptul și principiile fabricației suplă, s-au analizat abordările științifice referitoare la utilizarea tehnologiilor de integrare și au fost evaluate propunerile teoretice cu privire la integrarea informatică a sistemelor de fabricație adaptabile.

3. Contribuții privind strategia de realizare a unui sistem de fabricație integrat informatic

3.1. Integrarea informatică a sistemului de fabricație

Integrarea se realizează la nivel informatic, în baza capabilităților puse la dispoziție de tehnologia informației și comunicațiilor și presupune un proces de transformare evolutivă, în care subsistemele existente cresc în complexitate în vederea integrării organice la nivelul ecosistemului de producție.

Sistemul de fabricație integrat informatic este un sistem cu proprietăți cognitive, care interacționează, interpretează și reacționează cu mediul său. Pentru a atinge nivelul cognitiv, sistemul trebuie să fie capabil pentru achiziția, stocarea și procesarea datelor, precum și folosirea acestora pentru generarea de comenzi de ajustare a proceselor sau a comportamentului. Tehnologia prin care sistemul de fabricație se integrează informatic este sistemul cyber fizic (CPS), care este rezultatul transformării

sistemului de fabricație automatizat în noul sistem de fabricație (CPMS), păstrează caracteristicile automatizării, la care se adaugă capacitățile cognitive oferite prin integrare informatică.

În consecință, arhitectura sistemului CPS este formată din trei subsisteme:

1. Subsistemul fizic de fabricație – format din mașini, dispozitive, senzori, actuatori etc.
2. Subsistemul cybernetic – replica digitală a sistemului fizic de producție și infrastructura informatică (aplicații, baze de date, capacități de procesare și interpretare a datelor).
3. Subsistemul informatic – hardware, conecțivă și aplicații de gestionare a datelor.

Din aceasta perspectivă, proiectul de integrare informatică a sistemului de fabricație trebuie derulat pentru fiecare subsistem, coordonat.

Sistemul automatizat autoconfigurabil se realizează prin actualizarea activelor de fabricație cu echipamente și extensii (sisteme de componente) de fabricație care permit reconfigurarea liniilor de fabricație sau a celulelor de fabricație în funcție de cerințele de execuție a loturilor de produse. Acest obiectiv este completat la nivelul sistemului cybernetic cu cerințe de automatizare a proceselor corespondente și implementarea algoritmilor de supraveghere și corecție a fluxului de fabricație.

Prin îndeplinirea acestor obiective, sistemul de fabricație este pregătit pentru conectarea și integrarea cu sistemul cybernetic, arhitectura oferind soluții pentru reconfigurare și autoorganizare. (Vezi Fig. 3.1).

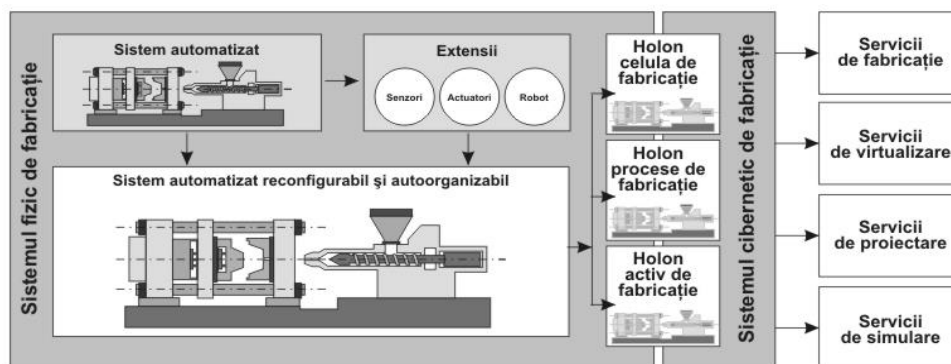


Fig. 3.1 Actualizarea sistemului de fabricație automatizat

3.1.1. Realizarea subsistemului cybernetic de fabricație

La nivelul subsistemului cybernetic se definește copia digitală a sistemului de fabricație, modelele digitale ale automatizării, procesele de fabricație, sunt proiectate produsele și serviciile, precum și structura sistemului informatic. Pentru sistemele de fabricație, principalele capacități se regăsesc în domeniile colectării, stocării și procesării datelor, a comunicațiilor (asigurarea transferului datelor) și în capacitățile de control și gestionare a proceselor. În funcție de destinația datelor colectate, acestea se împart în date sincrone și date asincrone proceselor de fabricație (Vezi Fig. 3.2).

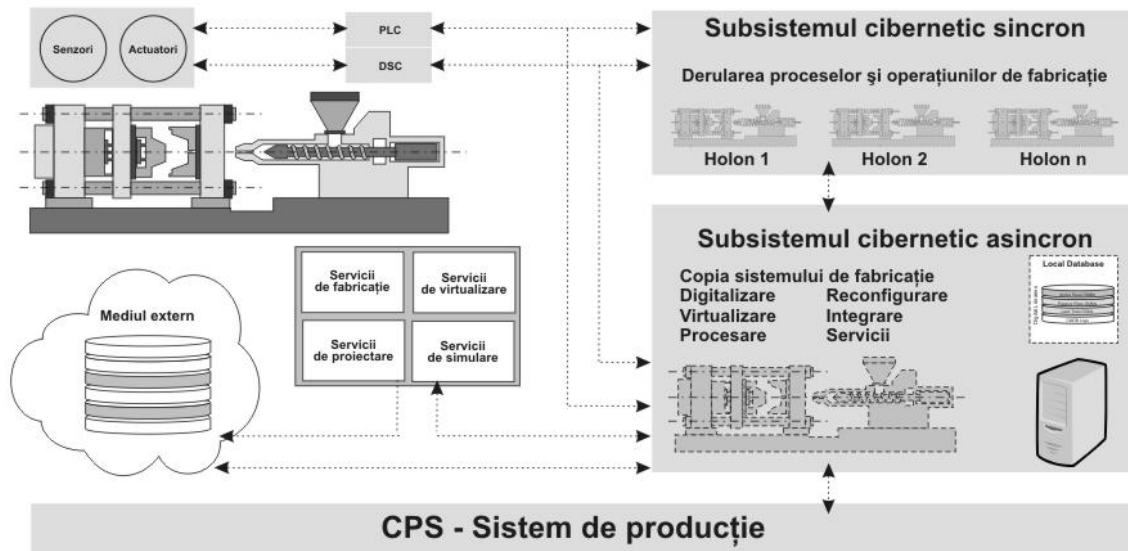


Fig. 3.2 Sistemul cibernetic – subsistemele sincron și asincron

3.1.2. Definirea copiei digitale a sistemului de fabricație

Elementul de bază prin care se creează copia digitală a sistemului de fabricație este o aplicație informatică de administrare a unui obiect (AIAO), pe care îl descrie. Această aplicație este o reprezentare digitală, standardizată a unui activ de fabricație, fizic sau logic. Prin definirea tuturor activelor de fabricație ca AIAO se realizează reprezentarea întregului sistem de fabricație prin componentele sale. Informațiile din conținut sunt structurate în module, care organizează aceste informații în:

- date tehnice - despre activul reprezentat
- operaționale - de integrare a activului

Construcțiv, modulul AIAO constituie o referință către un atribut, o funcție sau o componentă a obiectului reprezentat. Structurarea conținutului AIAO în funcție de adresabilitatea informației (sistemului sincron sau asincron proceselor de fabricație), permite definirea serviciilor la nivelul:

- activelor fizice sau digitale de fabricație
- proceselor de fabricație
- resurselor de fabricație (digitale sau fizice)
- capabilităților de fabricație

Unitățile de memorie a AIAO diferite pot fi concatenate sub forma unor AIAO complexe (AIAOC), capabile să aplice scenarii de producție, să ruleze procese care implică utilizarea mai multor active de producție, diferite simulări.

3.1.3. Definierea subsistemului cibernetic sincron proceselor de fabricație

Prin integrare informatică, structura angajată în procesele de fabricație realizează un sistem coerent, care administrează proprietățile activelor, succesiunea stărilor de operare, relațiile dintre componente și resursele implicate. Această structură, împreună cu situația de fabricație, descrisă de AIAOC, definește un holon cyber fizic (HCF) la nivelul arhitecturii sistemului integrat (vezi Fig. 3.3).

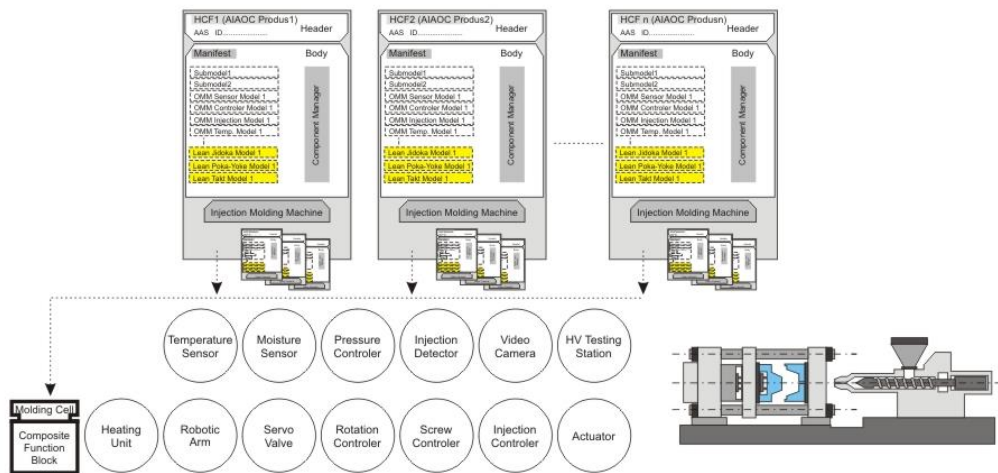


Fig. 3.3 Definierea holonilor la nivelul subsistemului cibernetic sincron

Transformarea se realizează prin separarea elementelor implicate activ în procese de fabricație, care se schimbă sau care își modifică setul de proprietăți la schimbarea holonilor, de cele pasive, care nu se schimbă la trecerea de la un scenariu de fabricație la altul și care asigură suportul sau continuitatea proceselor (157).

3.1.4. Definierea subsistemului cibernetic asincron proceselor de fabricație

Procesele care nu sunt sincrone fluxului de fabricație, gestionează aspecte și fenomene care impactează execuția acestora în amonte – prin adoptarea și integrarea de abilități cibernetică superioare care cresc performanța execuției, în timpul execuției proceselor – prin formularea și adoptarea de decizii pentru adaptarea superioară, și ulterioare – prin creșterea adaptabilității, predictibilității evoluției, integrarea la nivelul lanțului valoric al sistemului de producție sau integrarea ciclului de viață al produselor fabricate.

În timp ce sistemul cibernetic sincron este limitat de atributele și proprietățile activelor fizice și de capacitățile sistemului fizic de fabricație, sistemul cibernetic asincron are o arhitectură versatilă, care permite:

- organizarea/reorganizarea sistemului (integrare verticală)
- scalabilitatea întregului sistem de fabricație

- integrarea orizontală a CPS
- conectarea sistemului de fabricație cu mediul exterior

Obiectivul principal al sistemului cibernetic asincron este proiectarea, analiza și validarea structurilor complexe de AIAOC care definesc holonii cyber fizici. După ce aceste structuri sunt modelate, se derulează simulări pentru evaluarea integrității, a interoperabilității și securitatea cibernetică. Scalabilitatea pe care sistemul cibernetic asincron are loc pe două dimensiuni. Aceasta poate fi cantitativă, prin integrarea informatică de noi active fizice de fabricație, sau calitativă. Din punctul de vedere al scalabilității calitative, aceasta are loc prin creșterea capabilităților sistemului prin inovație tehnologică, încorporarea de noi algoritmi sau adoptarea de procese cognitive.

3.1.5. Realizarea subsistemului informatic

Obiectivul principal al subsistemului informatic este de a realiza sincronizarea sistemului de fabricație. Din perspectiva CPS, subsistemul informatic este format din mai multe rețele informatice:

- a. Rețeaua informatică a sistemului sincron proceselor de fabricație
- b. Rețeaua informatică a sistemului cibernetic asincron
- c. Rețeaua informatică externă sistemului de producție

3.1.6. Rețeaua informatică a sistemului sincron proceselor de fabricație

Este rețeaua care asigură:

- implementarea holonului cyber-fizic definit prin AIAOC
- stabilirea și menținerea comunicației între dispozitive sau echipamente
- asigurarea interacțiunii sistemului de fabricație cu mediul său
- colectarea și transmiterea datelor la nivel fizic
- comanda și controlul sistemelor de fabricație

Rețeaua informatică a sistemului sincron proceselor de fabricație (RISS) are rolul de a sincroniza celula de producție cu HCF, realizarea nivelului superior al automatizării fabricației, precum și conectarea sistemului sincron la sistemul cibernetic asincron și prin acesta la sistemul de producție.

Controlul și administrarea RISS se realizează la nivelul serverului, care preia scenariul de producție, definit la nivelul CPS prin AIAOC, și construiește HCF de fabricație. Legătura fizică dintre holonul cibernetic (aplicația server) și cel fizic (celula de fabricație) se realizează prin rețeaua de comunicații, formată din cablaj, routere, switch-uri, dispozitive WiFi.

3.1.7. Rețeaua informatică a subsistemului cibernetic asincron

Subsistemul cibernetic asincron este zona care acumulează cele mai noi capabilități oferite de tehnologiile avansate adoptate de sistemul de fabricație integrat informatic. Arhitectura rețelei informatice a subsistemului cibernetic asincron (RISA) este concepută să conecteze și să integreze informatic diferite zone ale sistemului de fabricație caracterizate prin derularea de activități și procese specifice și să asigure funcționalitatea internă, prin suportul hardware și software.

Conectarea zonelor active prin RISA permite interpretarea CPS sub forma unui complex de servicii (în relație cu mediul extern) sau de procese (în configurația internă a sistemului de producție), ceea ce favorizează îmbunătățirea randamentului economic (extern) și creșterea flexibilității (intern) prin identificarea și implementarea de procese noi, specializarea unor segmente de activități (repetabilitate), creșterea coordonării și realizarea sincronizării interne.

3.2.Sistemul de Baze de Date Integrate Informatic

Prin integrare informatică se adaugă capacitățile necesare realizării sistemului de fabricație flexibil, programabil, reconfigurabil, autoadaptabil, evolutiv, disponibil și inteligent. Informația valorifică datele cu scopul de a realiza integrarea celor trei elemente ale sistemului de fabricație fizic:

1. Mașini și echipamente
2. Resursa umană
3. Materia primă

Se obține astfel cibernetizarea principalelor surse prin care se adaugă valoare:

- A. Activele de producție
- B. Forța de muncă
- C. Procesele de fabricație ale produselor

Din această perspectivă, realizarea sistemului de fabricație integrat informatic impune definirea unei structuri integrate de gestionare și analiză a datelor. Sistemul de baze de date oferă suportul necesar accesării nivelului de inteligență al sistemului de fabricație integrat informatic și descrie distribuția informației ca sistem, într-o arhitectură proiectată la nivelul subsistemelor CPS, conform specificității acestora.

3.2.1. Subsistemul de Baze de Date ale Resurselor de Fabricație

Datele incluse subsistemului de baze de date ale resurselor de fabricație (SBDR) au ca destinație virtualizarea sistemului fizic de fabricație (mașini, oameni și materia primă), programarea modelelor digitale ale automatizării și descrierea capacităților necesare integrării informatice a sistemului de fabricație. Modelul SBDR este relațional, în care sunt structurate logic descrierile resurselor de fabricație. Prin proiectare, structura SBDR trebuie să permită CPS selecția capacităților, caracteristicilor și funcționalităților entităților fizice descrise pentru definirea acestora sub forma aplicațiilor informatice de administrare (AIAO), și să ofere suportul necesar pentru arhivarea AIAO complexe.

3.2.2. Subsistemul de Baze de Date ale Proceselor de Fabricație

Datele incluse Subsistemului de Baze de Date ale Proceselor de Fabricație (SBDP) au rolul de a asigura un flux de date constant și continuu la nivelul CPS, între subsistemul fizic și copia digitală a sistemului de fabricație care derulează operațiunile. Obiectivul este de a facilita interpretarea și adaptarea la variațiile factorilor de mediu și de a asigura continuitatea proceselor de fabricație.

Arhitectura SBDP trebuie să asigure datele necesare integrării AIAOC și realizarea holonului CPS care va executa operațiunile de fabricație. Sistemul de management al CPS evaluează performanța proceselor conform unui set de KPI predefinit. În acest scop, la nivelul SBDP se constituie o bază de date, alimentată prin interogarea datelor istorice cu scopul de a tranzacționa datele relevante. Rezultatele analizelor constituie tranzacții de intrare în baza de date operațională pentru înregistrarea evoluției performanței și pentru utilizare ulterioară, în procese asincrone de evaluare.

3.2.3. Subsistemul de Baze de Date ale Produselor Fabricate

În procesul de transformare a materiei prime în produs finit, există un moment în care produsul primește o identitate unică (cor de bare, QR code sau RFID, de exemplu). Din acel moment, informațiile despre proprietățile sale, de stare, utilizare sau de consum devin disponibile și sunt incluse ciclului de viață.

Datele incluse subsistemului de baze de date ale produselor fabricate (SBDF) au rolul de a conecta produsul fabricat cu mediul de transformare, de a-l introduce în propriul ciclu de viață și de a-l integra în lanțul valoric al sistemului de producție. Această bază de date asigură CPS cu informațiile necesare pentru identificarea soluției de fabricație. Datele relevante pentru ciclul de viață al produsului sunt tranzacționate ca ieșiri către o bază de date mari conectată la produse, care poate fi localizată local sau la un serviciu cloud de baze de date, prin Internetul obiectelor industriale (IIOT).

3.2.4. Managementul Sistemului de Baze de Date Integrate Informatic

Arhitectura Sistemului de Baze de Date Integrate Informatic (SBDI) necesită o soluție de management personalizată fiecărui subsistem al sistemului de fabricație integrat informatic. Conform acesteia, Sistemul de management este structurat sub forma unei platforme modulare, conform celor trei subsisteme (SBDR, SBDP și SBDF). Datorită importanței, am definit arhitectura Sistemului de Baze de Date Integrate Informatic care descrie distribuția informației într-o arhitectură proiectată la nivelul subsistemelor CPS – subsistemul fizic de fabricație, subsistemul cibernetic și cel informațional (vezi Fig.3.4).

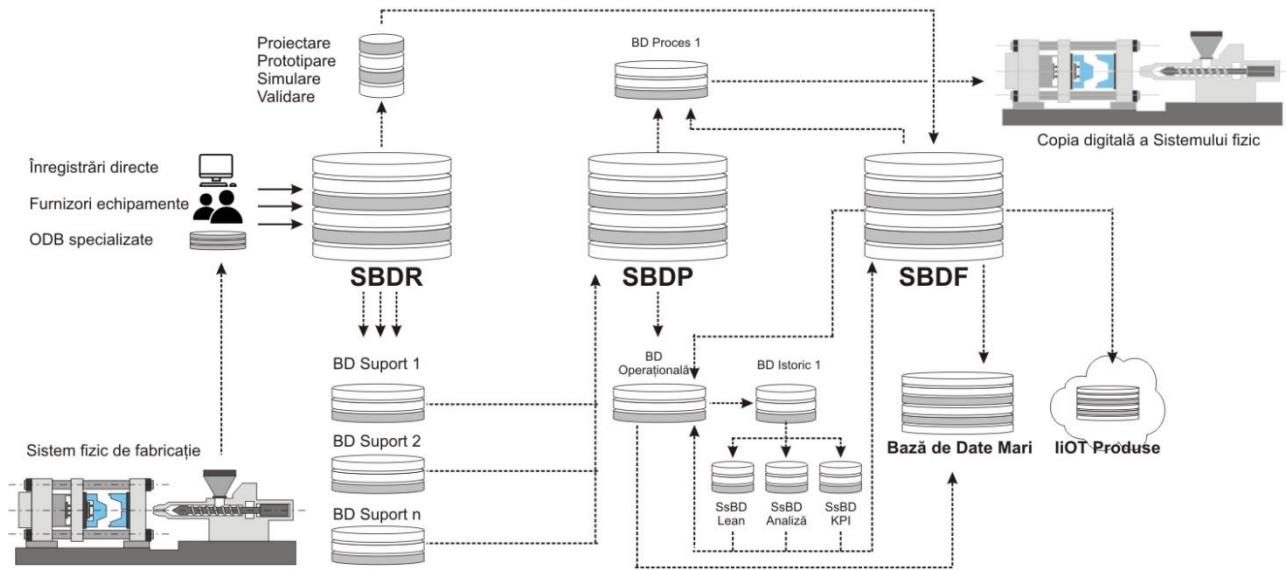


Fig. 3.12 Arhitectura Sistemului de Baze de Date Integrate Informatic

3.3. Sistemul de Management al Fabricației Integrate Informatic

Pentru a fi aplicabil, CPS trebuie să includă un sistem care să permită organizarea-reorganizarea sistemului de fabricație conform obiectivelor de fabricație și performanță. În forma evoluată, Sistemul de Management al Fabricației Integrate Informatic (MESI), integrează capacitățile sistemului de gestionare a fabricației automatizate la care sunt adăugate elemente care permit disocierea între resursele pasive și resursele active ale CPS (157), oferă instrumentele pentru definirea și gestionarea CPS, a subsistemelor cibernetice sincron și asincron proceselor de fabricație, a holonilor de fabricație și pentru gestionarea sistemului informatic și de comunicații a sistemului de fabricație.

Sistemul de gestionare al fabricației MESI se constituie ca platformă informatică la nivelul căreia funcțiile de bază sunt grupate sub forma unei succesiuni de aplicații care descriu procedura de proiectare și aplicare a CPS. Această platformă acoperă cerințele managementului operațional, iar structura modulară asigură scalabilitatea, flexibilitatea și suportul pentru integrare.

3.3.1. Dezvoltatorul de aplicații de administrare a obiectelor

Este o aplicație de programare unde sunt definite copiile digitale ale resurselor și activelor de fabricație. Mediul de programare trebuie să permită definirea obiectelor și a submodelelor de funcționare, atât ca obiecte digitale de reprezentare, cât și a diferitelor instanțe în care activul de fabricație este implicat. Aplicațiile informatice de administrare a obiectelor (AIAO) descriu orice

entitate care are calitatea de activ al sistemului de fabricație, fizică sau digitală. Scopul este de a include aceste submodele în descrierea AIAOC pentru o descriere detaliată a evoluției parametrilor de calitate în raport cu procesele executate.

3.3.2. Configuratorul sistemului informatic și de comunicații

Este o aplicație care are ca obiectiv integrarea informatică a entităților hardware și software pentru asigurarea unui flux de date continuu și coerent, pentru procesarea datelor în timp real, a compatibilității formatelor de comunicare între CPS și sistemul de producție. O secțiune specială a acestei aplicații este dedicată configurării componente SCADA a CPS.

Pentru a achiziționa date, în secțiunea SCADA este definit setul de semnale, alarme, evenimente și mesaje utilizate în definirea și tranzacționarea datelor. Secțiunea SCADA trebuie să gestioneze setul de semnale generat de sistemul de evaluare al proceselor CPS, ceea ce impune tratarea acestora în completare, și permite organizarea semnalelor, evaluarea și definirea acțiunilor interne CPS la detecția valorilor neconforme

3.3.3. Integratorul sistemului cyber-fizic

Este o aplicație care permite modelarea copiei digitale a întregului sistem de fabricație integrat informatic în baza aplicațiilor informatice de administrare a activelor (AIAO). Configuratorul permite conceperea holonilor de fabricație pentru fiecare tip de produs fabricat prin selecția modulelor corespondente proceselor de transformare incluse AIAO.

Pentru a sesiza mediul și a iniția acțiuni de adaptare la sesizarea variațiilor, holonul CPS trebuie conectat la structurile informatice care asigură factorii cognitivi și de inteligență. Aceasta se realizează prin conectarea modulelor AIAO la entitățile informatice care preiau datele culese la nivelul fizic de fabricație, le interpretează și le comunică holonului. Conectarea se realizează între AIAO și blocurile de funcții ale entităților, definite ca obiecte la nivelul SBDI.

Odată definiți, holonii sunt salvați ca aplicații de fabricație executabile și vor fi accesați la fiecare solicitare de fabricație. De asemenea, acești holoni constituie servicii de fabricație.

3.3.4. Managerul de fabricație

Aceasta este o aplicație informatică care preia principalele variabile incluse comenzilor de producție (tipul produsului de fabricat, dimensiunea lotului și termenul de fabricație dorit), selectează resursa de fabricație (holonul de fabricație), planifică fabricația, o aplică, execută controlul și intervine pentru adaptarea întregului sistem la apariția necesității.

Complexitatea acestei aplicații poate crește în funcție de nivelul de detaliu la care se dorește supervizarea, putând fi conectată la aplicații de analiză și evaluare, de unde poate prelua informații, estimări sau evaluări și le poate introduce în sistemul propriu de evaluare sau le poate grupa și transmite într-un format grafic spre vizualizare.

Managerul de fabricație poate include mai multe secțiuni prin care prezintă informații în timp real despre mașini, despre evoluția fabricației lotului, a calității produselor executate și poate calcula și comunica starea KPI-urilor.

3.4.Sistemul de Control Predictiv Integrat Informatic

Am ales Modelul de Control Predictiv (MPC) ca fiind soluția potrivită pentru o aplicație industrială de realizare a sistemului de fabricație integrat informatic datorită răspândirii acestui algoritm în domeniul ingineriei de control și atractivității metodologiei de proiectare. Modelul de control predictiv utilizează un model matematic de reprezentare a procesului pentru a prezice comportamentele viitoare ale sistemului și pentru a aplica o secvență de control pentru optimizarea în timp real a procesului supravegheat.

Procesul de realizare și implementare a algoritmului MPC începe prin definirea modelului liniar al sistemului de fabricație automatizat pentru a identifica funcția descriptivă a modelului spațiului de stare al sistemului și structura relevantă a variabilelor de comandă și de control.

Experimental, prin modelare matematică, se identifică o relație între valorile variabilelor de intrare și cele de ieșire, care descrie cel mai bine procesul. Acest model este o reprezentare aproximativă a sistemului care oferă posibilitatea de a discretiza modelul continuu prin aplicarea unei funcții de transformare. Pentru formularea predicțiilor, MPC are nevoie de calculul unei matrice dinamice de control (MDC), care să calculeze evoluția variabilelor de intrare și de ieșire care descriu starea sistemului la instanțele viitoare, iar rezultatele sunt implementate la nivelul sistemului pentru actualizarea stării interne și realizarea stării de echilibru.

Rezultatele MDC sunt preluate de MPC care va efectua calcule pentru sistemul modelat matematic, descris prin cele două ecuații de stare:

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m(k) + B_d \omega(k)$$

$$y(k) = C_m x_m(k)$$

În acest fel se obțin valorile de predicție a comportamentului pentru următoarea instanță.

Aceste calcule sunt raportate la constrângerile sistemului și sunt comparate cu valorile prognozate ale variabilelor măsurate. Optimizarea punctului de referință se face prin determinarea valorilor optime (de referință) a vectorilor variabilelor de comandă și control, astfel încât funcția obiectiv să fie îndeplinită.

3.5. Cercetări privind controlul predictiv pentru tehnologia de injecție cu reacție în matriță

Procesul de injecție cu reacție în matriță (Reaction Injection Molding - RIM) este utilizat în industria produselor polimerice pentru obținerea de piese din plastic. Acest proces se bazează pe reacția chimică dintre doi sau mai mulți monomeri lichizi pentru a obține un polimer cu caracteristici fizico-chimice diferite. Materiile prime utilizate cel mai des pentru acest proces sunt izocianatul și polioliul, iar prin reacția de polimerizare se obține poliuretanul.

Procesul reactiv de injecție în matriță include următoarele etape: pompele de dozare preiau din rezervoare cei doi monomeri, în raportul cantitativ cerut de rețeta de fabricație, pe care îi trimit către sistemul de amestecare. În acest sistem este asigurat mediul de reacție, iar parametrii procesului de polimerizare sunt gestionați de sistemul de control (159).

Aplicația de control predictiv va fi proiectată pentru o instalație care simulează acest proces. Obiectivele realizării instalației este de a simula complexitatea și dinamica instalației reale, iar obiectivul aplicației este de a gestiona procesul simulat (vezi Fig. 3.5).

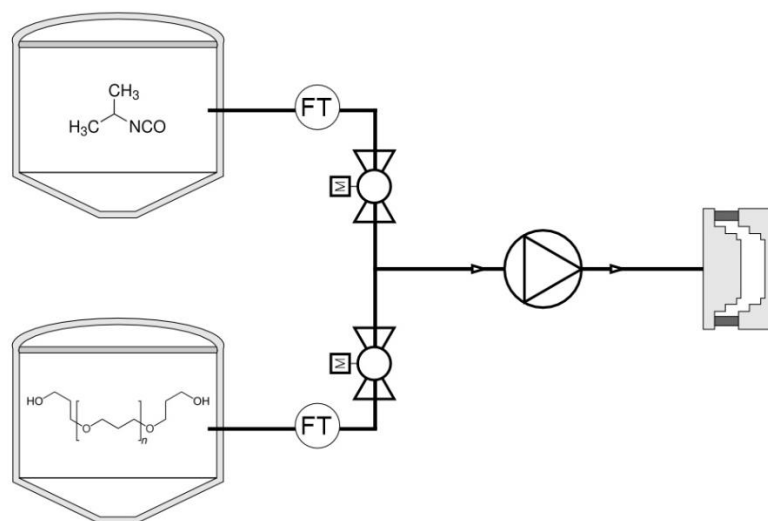


Fig. 3.5 Reprezentare a instalației de simulare RIM

Aplicația de control predictiv trebuie să gestioneze procesul, iar programarea MPC trebuie să descrie dinamica fluxurilor de fluide, calcularea predicției evoluției stării interne a sistemului și formularea feedbackului.

Obiectivul algoritmului MPC: să calculeze deschiderea optimă pentru fiecare intrare astfel încât să asigure o compoziție precisă la ieșire (55% izocianat și 45% polioliol), ajustând în timp real poziția actuatorilor pe baza feedback-ului de la senzori, pentru a realiza starea de echilibru a sistemului în orizontul de timp asociat unui ciclu de fabricație a unui produs. Primul pas în elaborarea aplicației este stabilirea parametrilor pentru simulare:

$T_s = 0.1$; perioada de eșantionare

$T_{sim} = 50$; perioada de simulare

time = 0: T_s : T_{sim} ;

Următoarea etapă este modelarea matematică a sistemului, care începe prin derularea unui experiment prin care sunt măsurate valorile variabilelor considerate. În cadrul experimentului s-au măsurat aceste variabile și s-au înregistrat următoarele valori:

Variabilele de stare:

t = 0:1:10;

x_izo = [0 0.009 0.018 0.026 0.031 0.035 0.039 0.043 0.046 0.046 0.046]; volumul de izocianat

x_pol = [0 0.003 0.007 0.013 0.021 0.027 0.032 0.035 0.038 0.038 0.038]; volumul de polioliol

x_ame = [0.000 0.750 0.720 0.667 0.596 0.565 0.549 0.551 0.548 0.548 0.548]; izocianatul utilizat în rețetă (procentual)

Variabilele de comandă:

u_izo = [0.00 0.78 1.57 2.26 2.70 3.04 3.39 3.74 4.00 4.00 4.00]; control valvă (izocianat)

u_pol = [0.00 0.32 0.74 1.37 2.21 2.84 3.37 3.68 4.00 4.00 4.00]; control valvă (polioliol)

u_pompa = [0.00 0.57 1.19 1.86 2.48 2.95 3.38 3.71 4.00 4.00 4.00]; comandă pompă

Variabilele de control

y_izo = [0 0.009 0.018 0.026 0.031 0.035 0.039 0.043 0.046 0.046 0.046]; debit izocianat

y_pol = [0 0.003 0.007 0.013 0.021 0.027 0.032 0.035 0.038 0.038 0.038]; debit polioliol

y_total = [0 0.012 0.025 0.039 0.052 0.062 0.071 0.078 0.084 0.084 0.084]; debit total

În etapa definirii variabilelor sistemului continuu s-au specificat și definit condiționările privind limitele acestora, care vor fi folosite pentru gestionarea sistemului:

xmin_ext = [xmin_izo_ext; xmin_pol_ext; xmin_ame_ext];

xmax_ext = [xmax_izo_ext; xmax_pol_ext; xmax_ame_ext];

umin_ext = [umin_izo_ext; umin_pol_ext; umin_pompa_ext];

umax_ext = [umax_izo_ext; umax_pol_ext; umax_pompa_ext];

ymin_ext = [ymin_izo_ext; ymin_pol_ext; ymin_total_ext];

ymax_ext = [ymax_izo_ext; ymax_pol_ext; ymax_total_ext];

Conform datelor experimentale, MPC va calcula elementele necesare definirii sistemului continuu. Prima etapă este determinarea valorilor de câștig a variabilelor sistemului, utilizate pentru calculul matricelor pentru fiecare variabilă:

$K_x = [0.5, 0.3, 0.8]$;

$K_u = [0.4, 0.35, 0.6]$;

$K_y = [0.45, 0.33, 0.7]$;

```

A_x = cell(1, length(K_x));
B_x = cell(1, length(K_x));
C_x = cell(1, length(K_x));
D_x = cell(1, length(K_x));

```

Următorul pas este aplicarea funcției de transfer în vederea determinării matricelor întregului sistem RIM simulat:

```

for i = 1:length(K_x)
    sys_tf_x = tf(K_x(i), [T_x(i) 1]);
    [A_x{i}, B_x{i}, C_x{i}, D_x{i}] = tf2ss(K_x(i), [T_x(i), 1]);
end
A = blkdiag(A_x{:});
B = blkdiag(B_u{:});
C = blkdiag(C_x{:});
D = blkdiag(D_y{:});

```

Prin discretizarea sistemului (obținerea matricelor de sistem discrete), aplicația MPC poate calcula elementele necesare pentru realizarea controlului predictiv. Primul pas este stabilirea traiectoriei de referință a variabilei de stare pentru obținerea unui sistem stabil (vezi Fig. 3.6):

```

sys_continuu = ss(A, B, C, D);
sys_discret = c2d(sys_continuu, T_s, 'zoh');
[A_d, B_d, C_d, D_d] = ssdata(sys_discret);
w(w > 0.55) = 0.55; (Valoarea de referinta dorita)

```

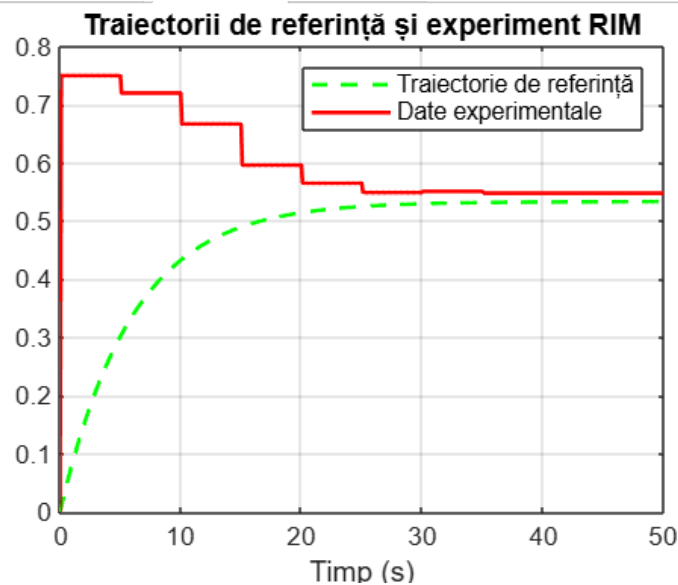


Fig. 3.6 Traiectoriile experiment și de referință a sistemului simulat RIM

Următorul pas este de a stabili coordonatele acțiunii modelului:

```

N_p = 50;    Orizontul de predicție
N_c = 9;    Orizontul de control
x_ext0 = [0; 0; 0]; Vectorul de stare inițială a sistemului
x = x_ext0;
N_sim = length(time);
n_inputs = size(B_d, 2);

```


Pentru realizarea controlului predictiv, este necesar să se stabilească funcția obiectiv. Funcția obiectiv urmărește minimizarea unei funcții de cost. În acest caz, micșorarea diferenței dintre variabila de ieșire și valoarea referinței corespunzătoare instanței la care sunt efectuate calculele. Pentru aceasta, MPC utilizează două matrice care penalizează deviația dintre valorile variabilelor de ieșire și valorile variabilelor de control, matricea Q (penalizează deviațiile variabilelor de stare față de valorile de referință) și matricea R (penalizează magnitudinea variabilelor de control).

```
Q_base = C_d' * C_d;
R = diag([0.01, 01, 0.001]);
for k = 1:N_sim
r = w(k); Referința curentă (la momentul k)
e = (r - C_d * x); Deviația față de referința curentă
```

În construcția controlerului sunt definite două matrice, hessiana și gradientul, care direcționează sistemul către minimizarea abaterii de la traiectoria de referință. Astfel, sistemul este condus către o soluție optimă, în orizontul de control.

```
H = zeros(N_c * n_inputs, N_c * n_inputs);
F = zeros(N_c * n_inputs, 1);
for i = 1:N_c
H_block = B_d' * Q * B_d + R;
row_start = (i-1) * n_inputs + 1;
row_end = i * n_inputs;
H(row_start:row_end, row_start:row_end) = 2 * H_block;
F((i-1)*n_inputs+1:i*n_inputs) = (C_d * A_d^i * x - r)' * Q * B_d;
end
H = (H + H') / 2;
```

Odată constituit, controlerul calculează valorile optimizate ale vectorului de comandă, ținând seama de condiționări.

```
u_opt = quadprog(H, F, [], [], [], [], umin_ext, umax_ext);
u_opt_step = max(umin_ext, min(umax_ext, u_opt(1:n_inputs)));
y_opt = C_d * x + D_d * u_opt_step;
y_opt = max(ymin_ext, min(ymax_ext, y_opt));
x_opt = max(xmin_ext, min(xmax_ext, A_d * x + B_d * u_opt_step));
```

Aceste actualizări au loc la fiecare iterație efectuată de controler, în orizontul de predicție. Aplicarea comenzilor controlerului determină sistemul gestionat la un comportament apropiat traiectoriei de referință, corespunzătoare unui sistem stabil (vezi Fig. 3.7).

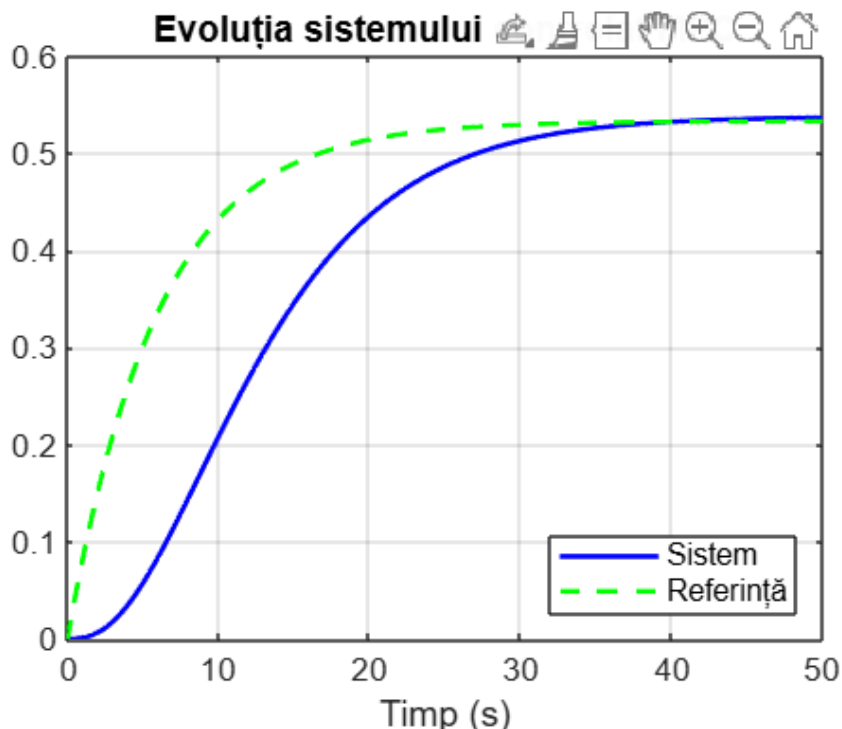


Fig. 3.7 Evoluția sistemului simulat controlat prin MPC

Curba care descrie evoluția sistemului subliniază o evoluție optimă, conform unei traiectorii de referință corespunzătoare evoluției către starea stabilă determinată prin modelul matematic care descrie procesul de fabricație.

Algoritmul MPC este proiectat ca sistem predictiv de control integrat informatic, care să permită reconfigurarea sistemului cyber-fizic, implicit maparea datelor conform specificului sarcinii de fabricație pentru care algoritmul va rula calcule predictive de optimizare.

Flexibilitatea și aplicabilitatea extinsă a modelului de control predictiv, permite dezvoltarea de soluții de control destinate unui activ de fabricație sau a întregului sistem de fabricație, raportat la procesul derulat de sistemul de fabricație integrat informatic.

3.5.1. Strategia de implementare a sistemului de control predictiv

Modelul predictiv de control permite abstractizarea elementelor reale în termeni matematici. În acest fel sistemul fizic de fabricație este reprezentat matematic într-un model căruia i se aplică o soluție pentru o problemă.

Strategia de implementare industrială a modelului de control predictiv se realizează la nivelul subsistemului cibernetic, iar flexibilitatea MPC oferă platforma pentru a fi integrat în structura unui sistem informatic complex, evolutiv, care utilizează modelarea matematică. Localizarea MPC este la nivelul sistemului cibernetic asincron proceselor de fabricație, la nivelul AIAO corespunzătoare activelor gestionate, iar sistemul de control predictiv se prezintă ca o aplicație informatică de

administrare complexă, definită la nivelul subsistemului sincron proceselor de fabricație, pentru fiecare holon de fabricație (vezi Fig. 3.8).

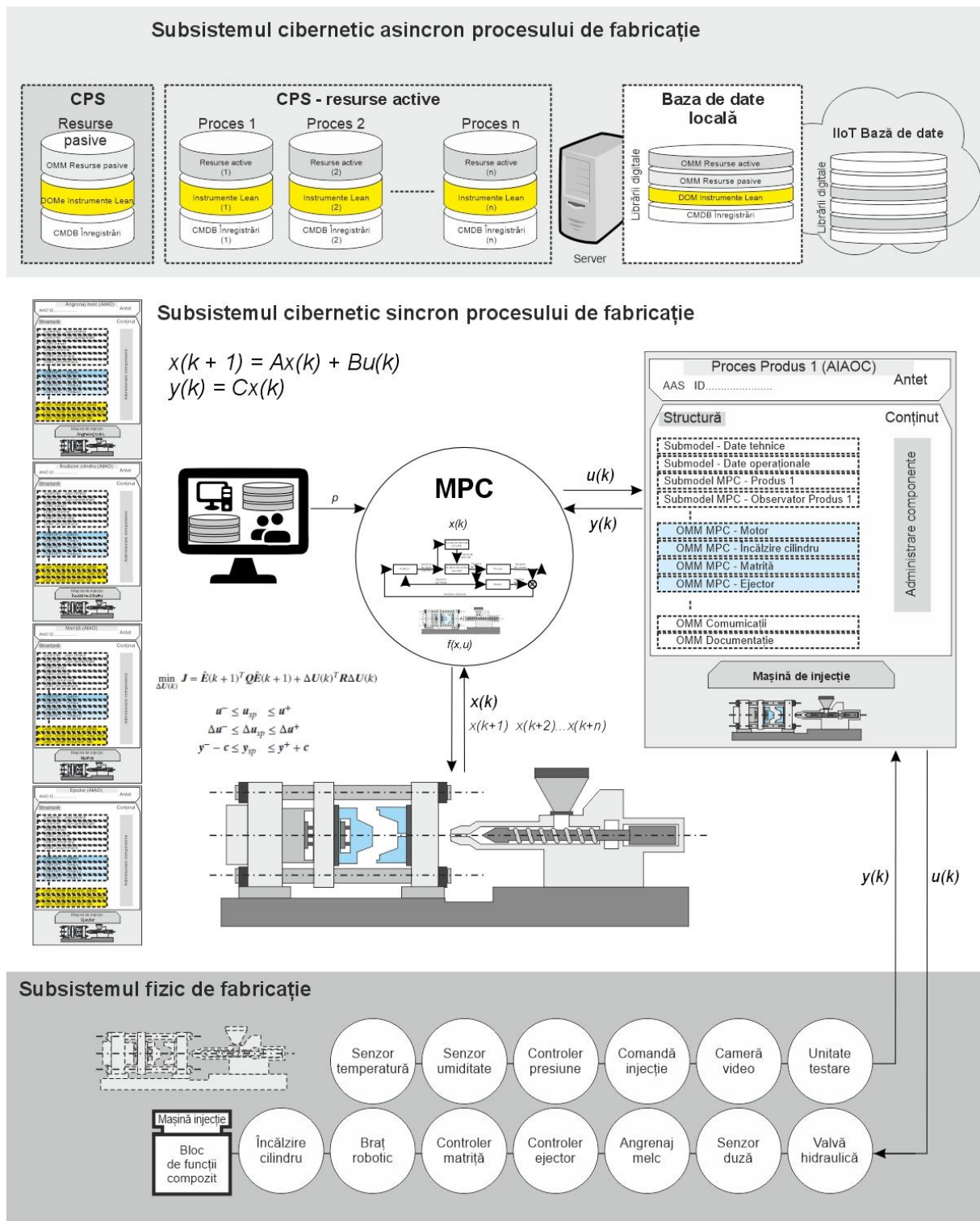


Fig. 3.8 Integrarea sistemului de control predictiv

3.6. Strategia de integrare informatică a sistemului de fabricație adaptabil

Sistemul de Fabricație Adaptabil Integrat Informatic (CPLS) este un sistem de fabricație integrat informatic, ale cărui elemente sunt autonome, autocofigurabile și în care procesele se derulează complet automatizat. Instrumentele CPLS aplicabile sunt digitalizate, beneficiază de aportul tehnologiilor avansate de fabricație, iar implementarea lor urmărește respectarea principiilor consacrate ale fabricației suple.

Instrumentele CPLS colectează informații în timp real din sistemul cibernetic sincron, formulează decizii și aplică comenzi de corecție prin AIAOC care rulează scenariul de producție. Instrumentele CPLS sunt grupate între sistemul fizic de fabricație și cel cibernetic și individualizează fiecare etapă a procesului de fabricație. În acest fel, celula de producție este transformată într-un sistem de fabricație suplu integrat informatic prin actualizarea componentelor fizice active, iar la nivel cibernetic – prin inițializarea elementelor digitale corespunzătoare, planificarea proceselor de producție, precum și activarea modulelor AIAL pentru supravegherea performanței celulei de fabricație (157).

3.6.1. Strategia de realizare a instrumentului Poka-Yoke

În procesul de fabricație, calitatea produselor polimerice este condiționată de un set complex de factori, începând de la etapa de pregătire a materiei prime până la depozitarea produsului finit. Măsurarea și evaluarea calității se realizează prin asigurarea parametrilor optimi pentru produsul final. Scopul acestor măsurători este identificarea erorilor (Poka-Yoke sau mistake proofing) și reducerea pierderilor prin eliminarea cauzelor care duc la risipă (160).

Parametri calității sunt specificați în modulele AIAOC ale mașinii de injecție, prin însumarea submodelelor. Pentru echipamente suplimentare, definirea Poka-Yoke se face prin propriul AIAL, în același mod. Aceste modele vor gestiona interacțiunea dintre componentele fizice și procesele de fabricație corespunzătoare, generând solicitări de ajustare a proceselor de fabricație și corectare a parametrilor de funcționare, care vor emite instrucțiuni de lucru care vor fi aplicate prin blocuri funcționale (160) (vezi Fig. 3.9).

În acest fel, la nivelul celulei de producție se aplică proceduri de control al calității, se verifică parametrii, se corectează abaterile și se selectează și se elimină produsele neconforme.

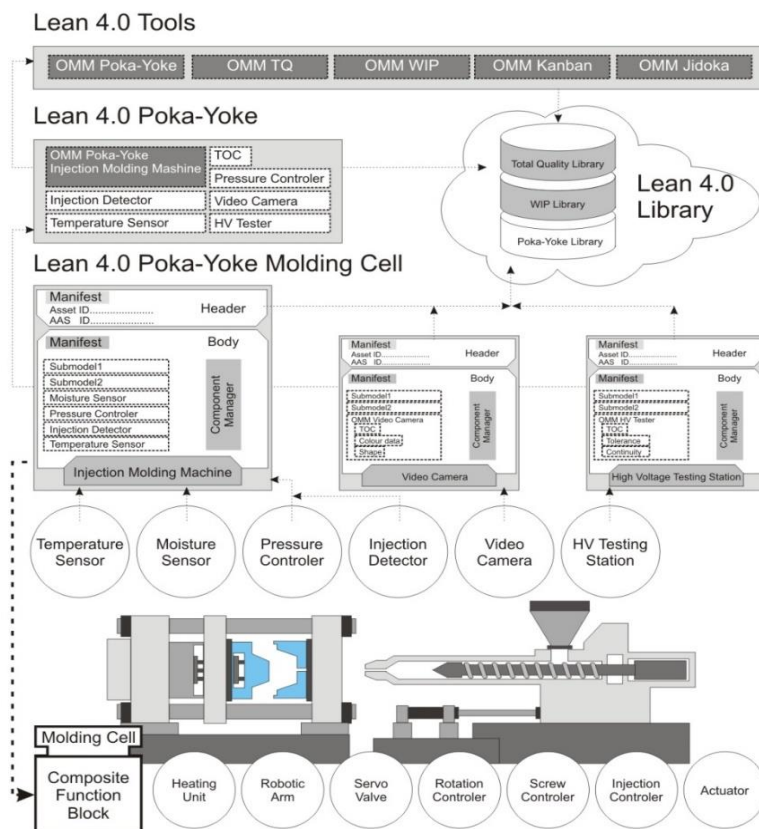


Fig. 3.9 Poka-Yoke Tool (160)

3.6.2. Strategia de aplicare a principiilor Lean Management

Pentru a deveni suplu, CPS trebuie să aplice principiile Lean și să integreze instrumentele CPLS la nivelul subsistemului sincron proceselor de producție, fiind necesară definirea unei structuri cibernetice suplimentare care să fie dispusă într-o poziție de coordonare a holonilor de fabricație, fizici și cibernetici. Într-un mod asemănător cu reprezentarea CPS la nivelul sistemului de fabricație integrat informatic, realizat prin însumarea AIAO, precum și cu modalitatea de definire a holonilor cyber fizici, CPSL este format din totalitatea instrumentelor Lean (AIAL) și a grupurilor de instrumente (MAIAL). Cele două structuri cibernetice, AIAOC și MAIAL, permit realizarea unui sistem de fabricație adaptabil, capabil să supravegheze procesele, să genereze evenimente pentru fiecare instrument Lean și pentru procesele de fabricație incluse HCF. Subsistemul cibernetic MAIAL este poziționat în cadrul sistemului ciber-fizic într-o poziție de coordonare a AIAOC, preluând informațiile furnizate de sistemul cibernetic pentru a aplica principiile Lean, pentru monitorizarea fluxurilor și proceselor și pentru a măsura performanța (161).

În acest fel, structura informațională este distribuită și ulterior arhivată în baze de date, pe medii de stocare, interne sau externe sistemului cibernetic asincron (162) (vezi Fig. 3.10).

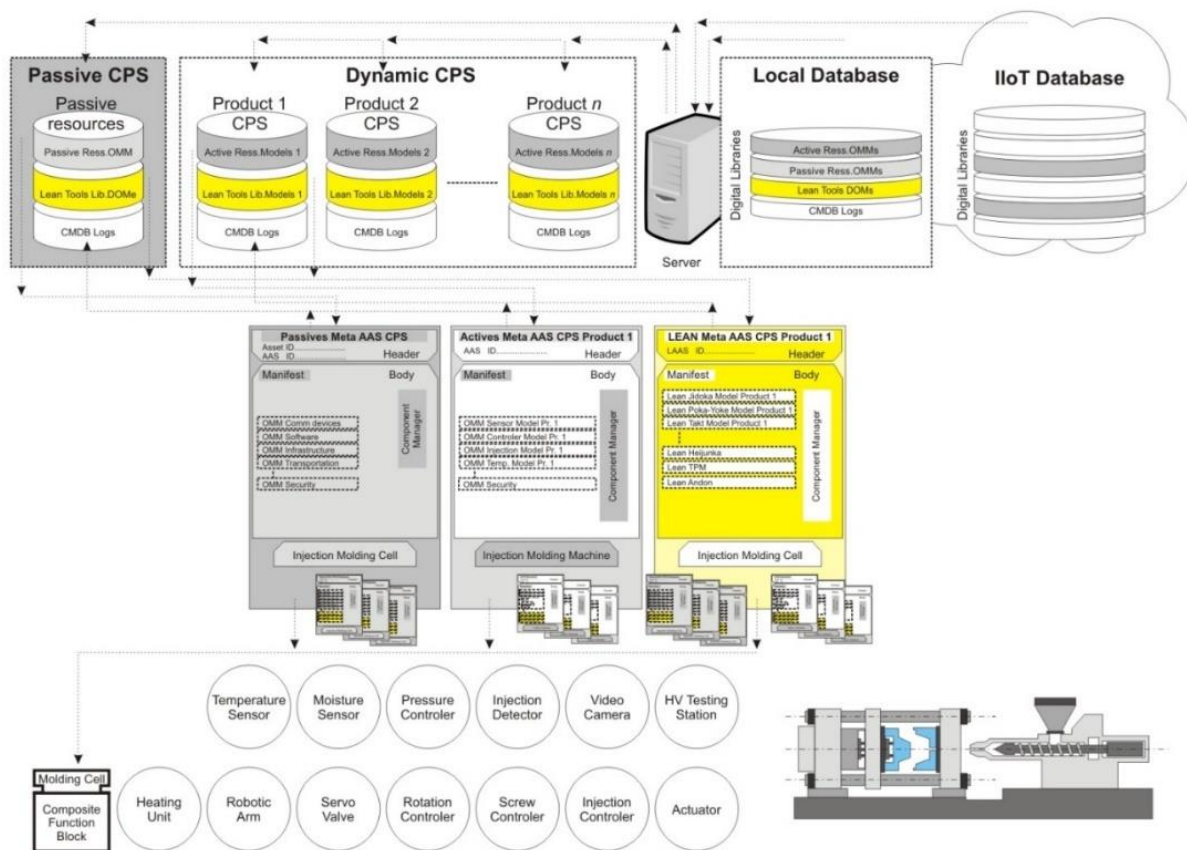


Fig. 3.10 Sistemul cyber fizic adaptabil (162)

4. Concluzii privind strategia proceselor industriale integrate informatic

Cel mai nou concept, cel de fabricație inteligentă, se bazează pe integrarea și difuzarea capabilităților tehnologiei informației la nivelul întregului sistem de producție, ceea ce a condus la un nou nivel de interoperabilitate între componentele sistemului și de interacțiune între sistem și mediul său. Prin integrare informatică, sistemul de fabricație devine inteligent, prin aceasta considerându-se îndeplinite criteriile prin care mediul sistemului permite realizarea unei producții complet automatizate, digitalizată și autoconfigurabilă, în care lanțul valoric se prezintă sub forma unei rețele descentralizate ale cărui elemente sunt autonome.

Stadiul cercetărilor reliefează atenția acordată realizării flexibilității, scalabilității și adaptabilității întregului sistem, conform conceptului Industrie 4.0, prin identificarea resurselor fizice, cibernetice și a capabilităților necesare pentru ca sistemul să devină predictiv, performant și pentru realizarea integrării la nivelul subsistemelor componente (orizontală), a sistemelor de producție și de servicii (verticală) și la nivelul lanțului valoric propriu (în adâncime).

Din studiul efectuat asupra stadiului actual se desprind următoarele concluzii:

C1. Conceptele de sistem de fabricație inteligentă, sistem de fabricație integrat informatic și sistem holonic de fabricație identifică soluții teoretice pentru realizarea integrării informatice.

C2. Încorporarea tehnologiilor avansate de fabricație și de comunicații oferă capacitățile necesare definirii sistemului cyber-fizic de fabricație conform conceptului de fabricație inteligentă.

C3. Cele mai noi tehnologii asigură implementarea conceptelor avansate de management al fabricației, printre acestea fabricația agilă, fabricația suplă, automatizarea adaptabilă și six sigma.

C4. Strategiile de transformare trebuie să țină seama de tipul tehnologiilor adoptate, care asigură integrarea sistemului de fabricație. Acestea sunt tehnologiile de calcul și de comunicații, de realizare a sistemului cyber-fizic, bazele de date mari, de realizare a algoritmilor, de virtualizare a proceselor și activelor de fabricație.

C5. Tacticile prin care strategiile sunt implementate trebuie să urmărească realizarea sistemului de fabricație inteligent, dinamic, flexibil, adaptabil, conectat, și definirea serviciilor de fabricație.

C6. Strategia de realizare a sistemului de fabricație integrat informatic trebuie să disocieze între tehnologiile de bază, care permit conectivitatea și asigură interacțiunea cu mediul, și tehnologiile suport, care pun la dispoziție capacitățile necesare transformării sistemelor fizice în subsisteme inteligente.

C7. Inteligența sistemului de fabricație integrat informatic se sprijină pe o arhitectură modulară, orientată către autoorganizare, a cărei elemente devin autonome și au capacități de autoadaptare și de cooperare. Aceste capacități se obțin prin implementarea de algoritmi prin care este gestionată evoluția și performanța în timp a activelor de fabricație, a proceselor și a întregului sistem. La nivelul sistemului de fabricație integrat informatic, algoritmul are rolul de sistem de control predictiv.

C8. Strategia de integrare informatică a sistemului de fabricație se dezvoltă într-un set de strategii subsecvente, corespunzătoare realizării integrării activelor de fabricație prin cibernetizare, a definirii sistemului de baze de date, a sistemului de management al fabricației și de implementare a sistemului de control predictiv.

Ulterior realizării sistemului cyber-fizic de fabricație, se va formula strategia de implementare a principiilor și instrumentelor fabricației adaptabile, iar în final de implementare a sistemului de management al fabricației adaptabile, integrate informatic.

5. Contribuții originale

Strategia de transformare a sistemului de fabricație automatizat urmează un proiect de integrare informatică în care subsistemele sunt actualizate prin tehnologiile avansate de fabricație.

CO1. Strategia formulată ține seama de etapele premergătoare activităților de integrare informatică pentru realizarea sistemului cyber-fizic, prin adoptarea tehnologiilor avansate de fabricație, de implementare a algoritmilor de control, precum și a tehnologiilor de calcul și comunicații.

CO2. Structurarea sistemului cibernetic în două subsisteme, conform funcțiilor pe care trebuie să le îndeplinească:

- Subsistemul cibernetic asincron proceselor de fabricație – care asigură o platformă de procesare superioară, pentru definirea holonilor sistemului fizic de fabricație.
- Subsistemul cibernetic sincron proceselor de fabricație – pentru reprezentarea structurilor fizice și a proceselor de fabricație.

CO3. Structurarea sistemului fizic în două subsisteme, conform rolurilor îndeplinite în arhitectura sistemului, prin separarea elementelor implicate activ în procese de fabricație, de cele pasive, care nu se schimbă la schimbarea scenariului de fabricație.

CO4. Descrierea arhitecturii subsistemului informatic, conform specificității necesităților celor două subsisteme cibernetice:

1. Rețeaua informatică a subsistemului cibernetic sincron proceselor de fabricație, care asigură implementarea holonilor, și comunicarea între dispozitive sau echipamente.
2. Rețeaua informatică a subsistemului cibernetic asincron, care acumulează capacitățile oferite de tehnologiile avansate adoptate de sistemul de fabricație integrat informatic.

CO5. Sistemul de Baze de Date Integrate Informatic este o structură informatică necesară integrării digitale a mașinilor, echipamentelor, resursei umane, iar datele despre materii prime, produse și procese sunt înmagazinate și devin disponibile pentru procesări ulterioare. Arhitectura sistemului de baze de date integrate informatic descrie distribuția informației la nivelul resurselor de fabricație, a proceselor de fabricație și a produselor fabricate. Sistemul de baze de date integrate informatic este administrat de o aplicație prin care sunt dezvoltate module pentru a fi integrate aplicației de management a sistemului de fabricație integrat informatic.

CO6. Arhitectura sistemului de management al fabricației integrate informatic permite controlul cibernetic al automatizării și oferă o platformă flexibilă și scalabilă. Platforma de management este modulară și flexibilă, încorporează instrumente digitale pentru a controla complexitatea sistemului de fabricație, iar funcțiile de bază sunt grupate sub forma unei secvențe de aplicații.

CO7. Descrierea sistemului de control predictiv integrat informatic ca formă evoluată a algoritmului modelului de control predictiv, cu obiectivul de a oferi o platformă flexibilă și scalabilă, care permite integrarea de algoritmi evoluți.

CO8. Descrierea strategiei și procesului de proiectare, dezvoltare și implementare a controlului predictiv, ca soluție inteligentă de integrare și de gestionare a sistemului și a proceselor de fabricație.

CO9. Am realizat o aplicație de control predictiv pentru o instalație de simulare a unui proces reactiv de injecție în matriță care evidențiază capabilitatea algoritmului de a gestiona și actualiza comportamentul în funcție de funcția obiectiv și de condiționări.

CO10. Definirea sistemului de fabricație adaptabil integrat informatic în care instrumentele și principiile fabricației adaptabile sunt digitalizate și ocupă un rol de coordonare și supraveghere a proceselor derulate.

CO11. Strategia definirii instrumentului Poka-Yoke pentru un sistem de fabricație a produselor polimerice integrat informatic unde, prin distribuirea instrumentului la nivelul celei de fabricație, sunt aplicate proceduri de control al calității, se corectează abaterile, iar produsele neconforme sunt selectate și eliminate.

CO12. Strategia de aplicare a principiilor Lean Management, în structura sistemului cyber-fizic, care conectează subsistemul cibernetic sincron cu cel asincron proceselor de fabricație, le coordonează, supraveghează procesele și aplică corecții.

CO14. Am publicat un număr de cinci lucrări științifice în care am abordat integrarea informatică a sistemelor de fabricație suplă.

6. Direcții de cercetare

Strategia cuprinsă în contribuții oferă o soluție pentru integrarea informatică a sistemului de fabricație, realizarea sistemului cyber-fizic și o structură de management al subsistemelor informatice necesare proiectării, implementării și gestionării proceselor de fabricație. Concluziile desprinse în această teză obligă la continuarea cercetărilor pentru îmbunătățirea soluției identificate.

În acest sens, am identificat și propun următoarele direcții de cercetare:

DC1. Realizarea procedurii de implementare a sistemului de producție integrat informatic, adaptabil.

DC2. Realizarea aplicației de implementare a sistemului de producție integrat informatic, inteligent.

DC3. Arhitectura aplicației informatice de configurare a sistemului cyber-fizic

DC4. Definirea unui proces suplu de management inteligent al fabricației integrate informatic.

DC5. Definirea aplicațiilor informatice de administrare complexe pentru algoritmi hibridi.

DC6. Realizarea funcției obiectiv complexe a sistemului de control predictiv.

DC7. Utilizarea matricelor modelului predictiv de control în procese de învățare specifice sistemelor de fabricație integrate informatic.

Bibliografie

1. Institutul de Lingvistică Iorgu Jordan (2016) *DEX - Dicționarul explicativ al limbii române*. București : Editura Univers Enciclopedic Gold.
2. Scallan, P. (2003) *Process Planning*. Oxford : Butterworth-Heinemann.
3. Black J.T., Kohser R.A. (2008) *Materials and Processes in Manufacturing*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
4. Hao Y. (2016) *Cloud Manufacturing. Strategic Alignment between Manufacturing Industry and Cloud Computing*. Stockholm : ACTA Wasaensia Industrial Management.
5. Sanders A., Elangeswaran C., Wulfsberg J. (2016) *Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing*. Journal of Industrial Engineering and Management.
6. Dumitrache I., Caramihai S. (2010) *Intelligent manufacturing: a new paradigm*. ScienceDirect. [Online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015309009>.
7. Yao X., Zhang J., Boer C. (2017) *From Intelligent Manufacturing to Smart Manufacturing for Industry 4.0 Driven by Next Generation Artificial Intelligence and Further On*. ResearchGate, pp. pp 311-318.
8. Subcommittee On Advanced Manufacturing. White House. (2018) *Strategy for American Leadership In Advanced Manufacturing*. [Online], [Cited: 11 30, 2019.] <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/10/Advanced-Manufacturing-Strategic-Plan-2018.pdf>.
9. Saberi S., Yusuff R.M. (2011) *Advanced Manufacturing Technology Implementation Performance: Towards A Strategic Framework*. Industrial Engineering and Operations Management, pp. 145-150.
10. Dorst W. (2016) *Implementation Strategy Industrie 4.0*. Bitkom e.V. [Online] www.zvei.org.
11. Cimini C., Pezzotta G., Pinto R., Cavalieri S. (2019) *Industry 4.0 technologies impacts in the manufacturing and supply chain landscape: an overview*. ResearchGate.
12. Valilai O., Houshmand M. (2013) *A collaborative and integrated platform to support distributed manufacturing systems using a service-oriented approach based on cloud computing paradigm*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, pp. pp. 110-127.
13. Lasi H., Kemper H., Fettke P., Feld T. (2014) *Industrie 4.0. Business and Information Systems Engineering the international journal of Wirtschaftsinformatik*.
14. Li B., Hou B., Yu W., Lu X., Yang C. (2017) *Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review*. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, pp.86-96.
15. Wang L., Wang D. (2016) *Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0*. IJ. Engineering and Manufacturing.
16. Frank A.G., Dalenogare L.S., Ayala N.F. (2019) *Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies*. International Journal of Production Economics.
17. Rudtsch V., Gausemeier J., Gesing J., Mittag T., Petera S. (2014) *Pattern-based Business Model Development for Cyber-Physical Production Systems*. Procedia CIRP 25, pp. 313 – 319.
18. Black JT., Kohser R.A. (2012) *Materials and Processes in Manufacturing. Eleventh Edition*. New York : John Wiley & Sons, Inc.,

19. Rodriguez M. D., Libbey R., Mondal S., Carbeck J., Michalik M. (2018) *Exponential technologies in manufacturing*. Deloitte Development LLC.,
20. Nielsen S., Nyberg E. (2016) *The adoption of Industry 4.0 - technologies in manufacturing – a multiple case study*. Digitala Vetenskapliga Arkivet. [Online] <http://www.diva-portal.se>.
21. Herman M., Pentek T., Otto B. (2015) *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. ResearchGate.
22. Herterich M., Uebernickel F., Brenner W. (2015) *The Impact of Cyber-Physical Systems on Industrial Services in Manufacturing*. Procedia CIRP 30, pp. 323 – 328.
23. Bader S. (2019) *Details of the Asset Administration Shell. The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 2.0)*. www.bmw.de. [Online] <https://www.zvei.org>
24. Bagheri B., Yang S., Kao H., Lee J. (2015) *Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment*. International Federation of Automatic Control.
25. *** (2005) *Oslo Manual. Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data*. OECD. [Online] [Cited: 01 10, 2020.] <http://www.sourceoecd.org/9264013083>.
26. Bansal A. K., Sangwan S., Shankar R. (2017) *Advanced Manufacturing Technology: defining the object and positioning it as an element of manufacturing strategy*. International Journal of Innovations in Engineering and Technology.
27. Da Costa S. G., Platts K., Fleury A. (2006) *Strategic selection of advanced manufacturing technologies (AMT), based on the manufacturing vision*. Semantic Scholar. [Online] <https://pdfs.semanticscholar.org>
28. Valamede L. S., Akkari A. C. S. (2020) *Lean 4.0: A New Holistic Approach for the Integration of Lean Manufacturing Tools and Digital Technologies*. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences.
29. Winter F., Dao Q.H., Von Witzendorff P. (2017) *Benefits of cyberphysical systems in work and process planning*. [book auth.] Morke T., Denkena B. *Cyber-Physical and Gentle Intelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence – Keys to Industry 4.0*. London : Elsevier Inc.
30. Conrad L. (2019) *On the Journey to a Smart Manufacturing Revolution*. www.industryweek.com. [Online] <https://www.industryweek.com/systems-integration/journey-smart-manufacturing-revolution>.
31. Zuo Y., Xu L., Zhang L. (2014) *IoT-Based Intelligent Perception and Access of Manufacturing Resource Toward Cloud Manufacturing*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, pp. pp 1547-1557.
32. Kerak P., Holubek R., Kostal P. (2012) *Novel Trends in the Intelligent Manufacturing Systems*. Tallinn : 8th International DAAAM Baltic Conference, Industrial Engineering.
33. Owen, R. (1817) *Observations on the Effect of the Manufacturing System*. London : R. and A. Taylor.
34. Williams, D.J. (1988) *Manufacturing Systems: An introduction to technology*. Chapman and Hall.
35. Salvendy G. (2001) *Handbook of Industrial Engineering. Technology and Operations Management*. New York : John Wiley & Sons, Inc.,
36. Considine D., Considine G. (1986) *Standard Handbook of Industrial Automation*. New York : Chapman and Hall,
37. Belai I., Drahos P. (2009) *The Industrial Communication Systems PROFIBUS and PROFINet*. Applied Natural Sciences.

38. Tianfield H., Qian F. (2008) *Re-configurable Industrial Automation*. World Congress on Intelligent Control and Automation - IEEE.
39. Mike H. (2019) *Smart Manufacturing - The Landscape Explained*. Scribd. [Online] <https://www.scribd.com/document/394564146/MESA-White-Paper-52-Smart-Manufacturing-Landscape-Explained-4>.
40. Zhang L., Luo Y., Tao F., Li B., Ren L., Zhang X., Guo H., Chang Y., Hu A., Liu Y. (2014) *Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm*. Enterprise Information Systems, pp. pp 167-187.
41. Esmeilian B., Behdad S., Wang B. (2016) *The evolution and future of manufacturing*. Journal of Manufacturing System, pp. pp. 80-95.
42. Schweichhart K. (2018) *Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*. Comisia Europeană. [Online] https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/a2-schweichhart-reference_architectural_model_industrie_4.0_rami_4.0.pdf.
43. Birje M., Challagidad P., Goudar R., Tapale M. (2017) *Cloud computing review: concepts, technology, challenges and security*. Int. J. Cloud Computing, pp. pp 32-57.
44. Mell P., Grance T. (2011) *The NIST Definition of Cloud Computing*. www.nvlpubs.nist.gov. [Online] <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>.
45. Zhang Q., Cheng L., Boutaba R. (2010) *Cloud computing: state-of-the-art and research challenges*. J Internet Serv Appl, pp. pp 7-18.
46. Wang L., Wang X. (2018) *Cloud-Based Cyber-Physical Systems in Manufacturing*. Springer International Publishing AG,
47. Tao F., Zhang L., Venkatesh V., Luo Y., Cheng Y. (2015) *Cloud manufacturing: a computing and service oriented manufacturing model*. ResearchGate.
48. Adamson G., Wang L., Holm M., Moore P. (2017) *Adaptive Robotic Control in Cloud Environments*. ResearchGate.
49. Würcher M. (2019) *The evolution of PLCs driving Industry 4.0 forward*. www.infineon.com.
50. Teti R., Kumara S. (1997) *Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems*. CIRP, pp. pp.629-652.
51. Schweichhart K. (2015) *Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*. Comisia Europeană. [Online] https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/a2-schweichhart-reference_architectural_model_industrie_4.0_rami_4.0.pdf.
52. Pascual D., Daponte P., Kumar U. (2020) *Handbook of Industry 4.0 and SMART Systems*. Boca Raton : Taylor & Francis Group, LLC,
53. Liu Y., Peng Y., Wang B., Yao S., Liu Z. (2017) *Review on Cyber-physical Systems*. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica.
54. Kühnle H., Bitsch G. (2015) *Foundations & Principles of Distributed Manufacturing. Elements of Manufacturing Networks, Cyber-Physical Production Systems and Smart Automation*. New York : Springer International Publishing,
55. McFarlane D., Bussmann S. (2003) *Holonic Manufacturing Control: Rationales, Developments and Open Issues. Agent-Based Manufacturing. Advances in the Holonic Approach*. Heidelberg : Springer Berlin,
56. Christensen J. (1994) *Holonic Manufacturing Systems: Initial architecture and standard directions*. Hanover : First European Conference on Holonic Manufacturing Systems.

57. Borangiu T., Trentesaux D., Leitão P. (2023) *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*. Cham : Springer Nature Switzerland,
58. Derigent W., Cardin O., Trentesaux D. (2020) *Industry 4.0: Contributions of Holonic Manufacturing Control Architectures and Future Challenges*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. Springer. 32
59. Wanga L., Haghghi A. (2016) *Combined strength of holons, agents and function blocks in cyber-physical systems*. Journal of Manufacturing Systems.
60. Knock J. (2014) *Advanced manufacturing technology implementation: An examination of organisational factors*. University of Praetoria. [Online] <https://pdfs.semanticscholar.org/af80/46a7da2cc8251dc872a6d235e35665eb8173.pdf>.
61. Ustundag A., Cevikcan E. (2018) *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. Cham : Springer International Publishing,
62. Kohlhuber M., Kage M., Karg M. (2017) *Acatech – National Academy of Science and Engineering*. ResearchGate.
63. Gerbert P., Lorenz M., Rüßmann M., Waldner M., Justus J., Engel P., Harnisch M. (2015) *Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group. [Online] <https://www.zvw.de/media.media.72e472fb-1698-4a15-8858-344351c8902f.original.pdf>.
64. Büttner, S., Mucha H., Funk M., Kosch T., Aehnelt M., Robert S., Röcker C. (2017) *The Design Space of Augmented and Virtual Reality Applications for Assistive Environments in Manufacturing: A Visual Approach*. Rhodos : Petra, International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments.
65. Syberfeldt A., Holm M., Danielsson O., Wang L., Brewster R. (2016) *Support systems on the industrial shop-floors of the future – operators’ perspective on augmented reality*. 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS).
66. Tideman M., Voort M., Houten F. (2008) *A new product design method based on virtual reality, gaming and scenarios*. Int J Interact Des Manuf.
67. Nagorny K., Lima-Monteiro L., Barata J., Colombo A. (2017) *Big Data Analysis in Smart Manufacturing: A Review*. Int. J. Communications, Network and System Sciences.
68. Uckelmann D., Harrison M., Michahelles F. (2011) *An Architectural Approach Towards the Future Internet of Things*. ResearchGate.
69. Rauen H. (2016) *Industrie 4.0 in practice – Solutions for industrial applications*. VDMA. [Online] https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/26342484/Industrie_40_in_practice_2016_1529498623105.pdf/f5883098-521d-0b50-2a97-b1471ff13ace.
70. Lee J., Noh S., Kim H., Kang Z. (2018) *Implementation of Cyber-Physical Production Systems for Quality Prediction and Operation Control in Metal Casting*. MDPI.
71. Chow R. (2014) *Controlling Data in the Cloud: Outsourcing Computation without Outsourcing Control*. Management of Computing and Information Systems.
72. Wang L., Feng H., Cai N. (2003) *Architecture Design for Distributed Process Planning*. Journal of Manufacturing System.
73. Djassemi M. (2008) *Emergence of Multitasking Machining Systems: Applications and Best Selection Practices*. Journal of Manufacturing Technology Management.
74. Derler P., Lee E., Vincentelli A. (2012) *Modeling Cyber-Physical Systems*. Proceedings of the IEEE.

75. Wang L., Haghghi A. (2016) *Combined strength of holons, agents and function blocks in cyber-physical systems*. Journal of Manufacturing Systems.
76. Othman M., Minhat M., Jamaludin Z. (2017) *An overview on STEP-NC compliant controller development*. International Conference on Mechanical Engineering Research.
77. Valilai O., Houshmand M. (2010) *INFELT STEP. An integrated and interoperable platform for collaborative CAD/CAPP/CAM/CNC machining systems based on the STEP standard*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing.
78. Mavriklos D., Alexopoulos K., Xantakis E., Papas M. (2011) *A Web-Based Platform for Collaborative Product Design, Review and Evaluation*. ResearchGate.
79. Choi S., Noh S. (2010) *XML-based neutral file and PLM integrator for PPR information exchange*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing.
80. *** (2019) Business Dictionary. [Online] <http://www.businessdictionary.com>
81. Kagermann H., Wahlster W. (2013) *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. www.acatech.de. [Online] https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf.
82. *** (2019) Business Dictionary. [Online] <http://www.businessdictionary.com>
83. Onar S., Ustundag A. (2018) *Smart and Connected Product Business Models*. [book auth.] Cevikcan E., Ustundag A. *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. pp. 25-42. Cham : Springer International Publishing,
84. Johnson M. (2019) *Reinvent Your Business Model*. www.thegeniusworks.com [Online] <https://www.thegeniusworks.com/wp-content/uploads/2018/10/Reinvent-Your-Business-Model.pdf>.
85. Wirtz B., Pistoia A., Ullrich S., Gottel V. (2015) *Business Models: Origin, Development and Future Research Perspectives*. Long Range Planning.
86. Guoa L., Weib S., Sharmac R., Rongd R. (2017) *Investigating e-business models' value retention for start-ups: The moderating role of venture capital investment intensity*. International Journal of Production Economics.
87. *** (2017) Comisia Europeană. *Investițiile într-o industrie inteligentă, inovatoare și durabilă*. www.ec.europa.eu. [Online] <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/25384>.
88. *** (2018) Guvernul României. *Document de politică industrială a României*. www.economie.gov.ro. [Online] <http://www.economie.gov.ro/images/politici-industriale/SIPOCA7/Document%20de%20Politica%20Industrială%20a%20Romaniei.pdf>.
89. *** (2016) Industrial Internet Consortium. *Business Strategy and Innovation Framework*. [Online] https://www.iiconsortium.org/pdf/Business_Strategy_and_Innovation_Framework_Nov_2016.pdf.
90. Kwan A., Schroeck M., Kawamura J. (2019) *Architecting an operating model. A platform for accelerating digital transformation*. Deloitte. [Online] <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/reinvent-operating-model-digital-transformation.html>.
91. Minturn A., Lomax M., Streatfield P. (2019) *A practical roadmap for the implementation of Industry 4.0*. Bosch Rexroth Ltd. [Online] https://dc-gb.resource.bosch.com/media/gb/trends_and_topics_7/industry_4_0/white_paper/BOR1359_-_Industry_4.0_whitepaper_-_AW-HR.pdf.
92. Tambo T., Østergaard K. (2015) *Validity of Business Strategy as Driven in Technology Management - A Critical Discussion*. IAMOT 2015. International Association for Management of Technology

93. Machuca J., Vega P.G. (2009) *Manufacturing Strategy and Technology Interaction: Fit Line & Impact*. Díez de los Ríos J.L.P. Orlando : SPAIN POMS 20th Annual Conference .
94. David B. (2002) *The Economics of Science and Technology*. Journal of Technology Transfer, pp. 155–203.
95. Rubas D. (2020) *Technology Adoption: Who Is Likely to Adopt and How Does the Timming Affect the Benefits?* Texas A&M University Libraries. [Online] <https://core.ac.uk/download/pdf/4268710.pdf>.
96. Rahardjo J., Yahya S. (2010) *Advanced Manufacturing Technology Implementation Process in SME: Critical Success Factors*. Jurnal Teknik Industri, pp. 101-108.
97. Gausemeier J., Anacker H., Dumitrescu R. (2013) *On the Way to Intelligent Technical Systems*. Malacca : International Conference on Advances in Mechanical Engineering,
98. Geissbauer R., Vedso J., Schrauf S. (2016) *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. PwC 2016 Global Industry 4.0 Survey
99. Tantik E., Anderl R. (2017) *Potentials of the Asset Administration Shell of Industrie 4.0 for Service-Oriented Business Models*. Procedia CIRP 64, pp. 363 – 368.
100. BMWi., Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2019) *SPECIFICATION. Details of the Asset Administration Shell*. www.bmw.de. [Online]
101. Marseu E., Kolberg D., Weyer S. (2017) *Exemplary transfer of the RAMI 4.0 Administration Shell to the SmartFactory KL System Architecture for Industrie 4.0 Production Systems*. www.smartfactory.de. [Online] https://smartfactory.de/wp-content/uploads/2017/11/SF_WhitePaper_2-1_EN-1.pdf.
102. D-S Ionel, Opran C., Lamanna G. (2020) *Lean Manufacturing 4.0 of Polymeric Injection Molding*. 389, Weinheim : WILEY-VCH, Vol. Macromol. Symp.
103. BMWi, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2020) *Plattform Industrie 4.0. Details of the Asset Administration Shell from idea to implementation*. [Online] <https://www.plattform-i40.de/>.
104. BMWi, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2020) *Describing Capabilities of Industrie 4.0 Components*. www.bmw.de. [Online] <https://www.plattform-i40.de/>.
105. BMWi, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2018) *Details of the Asset Administration Shell - Specification*. www.bmw.de. [Online] <https://www.plattform-i40.de/>.
106. BMWi, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2021) *AAS Reference Modelling. Plattform Industrie 4.0*. [Online] <https://www.plattform-i40.de/>.
107. Liu Y., Peng Y., Wang B., Yao S., Liu Z. (2017) *Review on Cyber-physical Systems*. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica.
108. Denkena B., Morke T. (2017) *Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence – Keys to Industry 4.0*. London : Elsevier Inc.,
109. Denkena B., Dittrich M.A., Winter F. (2017) *Adaptive process planning and control*. [book auth.] Morke T., Denkena B. *Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence – Keys to Industry 4.0*. London : Elsevier Inc.,
110. Denkena B., Neff T. (2017) *Teachless process monitoring for single item production*. [book auth.] Morke T., Denkena B. *Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence – Keys to Industry 4.0*. London : Elsevier Inc. ,
111. Mehta B. R., Reddy Y. J. (2015) *Industrial Process Automation Systems. Design and Implementation*. Oxford : Elsevier Inc.,

112. Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C. (2019) *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. London : Elsevier Inc.,
113. Wang L., Wang X.V. (2018) *Cloud-Based Cyber-Physical Systems in Manufacturing*. Cham : Springer International Publishing AG.
114. Wooldridge M. (2002) *An Introduction to Multiagent Systems*. Sussex : John Wiley & Sons Ltd,
115. Göhner P., Weyrich M. (2014) *Agent-based Concepts for Manufacturing Automation*. Stuttgart : Multiagent System Technologies.
116. Tianfield H., Qian F. (2008) *Re-configurable Industrial Automation*. World Congress on Intelligent Control and Automation.
117. Leitao P., Colombo A.W., Karnouskos S. (2016) *Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges*. Computers in Industry 81, pp. 11-25.
118. Pechoucek M., Vladimír Marík V. (2008) *Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies*. Springer Science, Business Media.
119. Tiwari D.D., Naskar S., Sai A.S., Palleti V.R. (2021) *Attack Detection Using Unsupervised Learning Algorithms in Cyber-Physical Systems*. Computer Aided Chemical Engineering.
120. Crowder R. (2020) *Electric Drives and Electromechanical Systems Applications and Control. Second Edition*. Oxford : Elsevier Ltd.,
121. Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D. (2017) *Industrial Internet of Things. Cybermanufacturing Systems*. Cham : Springer International Publishing,
122. Connolly T., Begg C. (2005) *Database Systems. A Practical Approach to Design, Implementation, and Management*. Edinburgh : Pearson Education Limited,
123. Silberschatz A., Korth H., Sudarshan S. (2011) *Database System Concepts. Sixth Edition*. New York : McGraw-Hill
124. Kao B., Garcia-Molina H. (1994) *An Overview of Real-Time Database Systems*. [book auth.] Stoyenko A., Halang W. *Real Time Computing*. Sint Maarten, NL : NATO Advanced Study Institute on Real Time Computing,
125. Dhaka V.S., Vyas S. (2014) *The Use and Industrial Importance of Virtual Databases*. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering.
126. Wada Y., Watanabe Y., Syoubu K., Miida H., Sawamoto J. (2012) *Virtual Database Technology for Distributed Database in Ubiquitous Computing Environment*. American Journal of Database Theory and Application.
127. Guzman E., Andres B., Raul Poler R. (2021) *Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: a holistic framework and a systematic review*. Journal of Industrial Information Integration,
128. Manuel Díaz-Madroño, Mula J., Peidro D. (2014) *A review of discrete-time optimization models for tactical production planning*. International Journal of Production Research,
129. Andres B., Sanchis R., Polerc R. (2016) *A Cloud Platform to support Collaboration in Supply Networks*. Int. J. Prod. Manag. Eng.,
130. Cormen T., Leiserson C., Rivest R., Stein C. (2022) *Introduction to Algorithms. Fourth Edition*. Cambridge, Massachusetts London : Massachusetts Institute of Technology,
131. Horowitz E., Sahni S., Rajasekaran. (1998) *Computer algorithms*. New York : W.H.Freeman and Company,

132. Erickson J. (2019) *Algorithms*. Creative Commons Attribution 4.0 International License.
133. Wanga J., Maa Y., Zhanga L., Gaob R., Wuca D. (2018) *Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications*. Journal of Manufacturing Systems,
134. Wang L. (2009) *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*. London : Springer-Verlag,
135. Camacho E., Bordons C. (1999) *Model Predictive Control*. London : Springer-Verlag,
136. Khaled N., Pattel B. (2018) *Practical Design and Application of Model Predictive Control*. Oxford : Elsevier Inc.,
137. Seborg D. (2017) *Process dynamics and control*. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc.,
138. Ndje M. (2018) *Dynamic Matrix Control and Tuning Parameters Analysis for a DC Motor System Control*. Engineering, Technology & Applied Science Research.
139. *** (2024) Matlab. Mathworks. Help Center. [Online] <https://www.mathworks.com/help>
140. Zuehlke D. (2010) *Smart Factory towards a factory-of-things*. ScienceDirect.
141. Kolberg D., Zühlke D.K. (2015) *Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies*. IFAC.
142. Blöchl S., Schneider M. (2016) *Simulation Game for Intelligent Production Logistics – The Pull Learning Factory*. Procedia CIRP.
143. Biedermann H., Kinz A. (2018) *Lean Smart Maintenance—Value Adding, Flexible and Intelligent Asset Management*. BHM.
144. Gingerich K. (2015) *Lean production and automation Select the best production platform for Lean operations*. [Online] [Cited: mai 30, 2019.] <https://www.plantengineering.com/articles/lean-production-and-automation/>.
145. Satoglu S., Ustundag A., Cevikcan E., Durmusoglu M. (2018) *Lean Production Systems for Industry 4.0*. [book auth.] Cevikcan E., Ustundag A. *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. Springer International Publishing,
146. Smelov V.G., Kokareva V.V., Malykhin A.N. (2016) *Lean organization of additive manufacturing of aircraft purpose products*. International Journal of Engineering and Technology.
147. Hernandez C., Brioso X. (2018) *Lean, BIM and Augmented Reality Applied in the Design and Construction Phase: A Literature Review*. International Journal of Innovation, Management and Technology.
148. Sanders A., Elangeswaran C., Wulfsberg J. (2016) *Industry 4.0 implies lean manufacturing research activities in industry 4.0*. Journal of Industrial Engineering and Management.
149. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. (2013) *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. Future Generation Computer Systems.
150. Lee J., Bagheri B., Kao H. (2014) *Recent Advances and Trends of Cyber-Physical Systems and Big Data Analytics in Industrial Informatics*. Proceeding of Int. Conference on Industrial Informatics.
151. MacKerron G., Kumar M., Kumar V., Esain A. (2014) *A Case Study on E-Kanban Implementation: A Framework for Successful Implementation*. Supply Chain Strategies, Issues and Models.
152. Weber A. (2016) *Automation and Lean Help Magna Stay Flexible*. [Online] <https://www.assemblymag.com/articles/93268-automation-and-lean-help-magna-stay-flexible>.
153. Rahman A. (2010) *Data Analytics Supporting Lean Manufacturing Towards Industry 4.0 Through Simulation: A Review*. Vol. Journal of Engineering and Management in Industrial System.

154. Tran T.A., Ruppert T., Abonyi, J. (2021) *Indoor Positioning Systems Can Revolutionize Digital Lean*. Basel : MDPI, Vol. Appl. Sci.
155. Cottyn J. (2012) *Design of a Lean Manufacturing Execution System Framework*. Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur,
156. Cottyn J., Van Landeghem H., Stockman K., Derammelaere S., (2011) *The Role of a Manufacturing Execution System During a Lean Improvement Project*. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology,
157. Ionel D.S., Opran C.G., Lamanna G. (2020) *Lean Manufacturing 4.0 of Polymeric Injection Molding*. Macromolecular Symposia.
158. Lehmenkühler P., Stommel M. (2022) *Influence of the Reaction Injection Molding Process on the Thermomechanical Behavior of Fast Curing Polyurethane*. Journal of Manufacturing and Materials Processing,
159. *** (2008) *Introduction to Reaction Injection Molding. Empire Foam*. [Online] [Cited: 10 10, 2024.] <https://empirefoam.com>.
160. Ionel D-S., Opran C.G., Lamanna G. (2021) *Lean 4.0 Dynamic Tools for Polymeric Products Manufacturing in Industry 4.0*. Macromolecular Symposia.
161. Ionel D-S., Opran C.Gh., Vălimareanu B.C. (2020) *Lean Manufacturing 4.0 - dynamic physical and cybernetic system for Industry 4.0*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.
162. Ionel D-S., Opran C.Gh. (2021) *Dynamic Lean 4.0 Cyber-Physical System for Polymeric Products in Industry 4.0*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
163. Ionel D-S., Lamanna G., Opran C. G. (2022) *Intelligent Link between Lean Manufacturing and the Cyber-Physical Industry 4.0 System*. Macromolecular Symposia: Volume 404.
164. Wang X.V., Xu X.W. (2013) *ICMS: A Cloud-Based Manufacturing*. [book auth.] Mehnen J., Li W. *Cloud Manufacturing. Distributed Computing Technologies for Global and Sustainable Manufacturing*. London : Springer-Verlag,
165. AMT., The Association for Manufacturing Technology. (2019) *MTConnect Standard. MT Connect Institute*. [Online] <http://www.mtconnect.org/>.
166. Lachmayer R., Mozgova I., Sauthoff B., Gottwald P., Scheidel W. (2017) *Algorithmic design evolution based on product life cycle information*. [book auth.] Morke T., Denkena B. *Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. Genetics and Intelligence – Keys to Industry 4.0*. London : Elsevier Inc.
167. Womack J., Jones D. (2003) *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, Revised and Updated*. Free Press.
168. Wang P., Gao R., Fan Z. (2015) *Cloud Computing for Cloud Manufacturing: Benefits and Limitations*. Journal of Manufacturing Science and Engineering.
169. Wang X., Mohammed A., Wang L. (2015) *Cloud-based Robotic System: Architecture Framework and Deployment Models*. ResearchGate.
170. Chen Y., Du Z., Garcia-Acosta M. (2010) *Robot as a Service in Cloud Computing*. IEEE International Symposium on Service Oriented System Engineering.
171. Paulraj A., Lado A., Chen I. (2008) *Inter-organizational communication as a relational competency: Antecedents and performance outcomes in collaborative*. Journal of Operations Management.

Listă lucrări publicate

1. Ionel R. Dănuț-Sorin, Constantin Gheorghe Opran, Giuseppe Lamanna - **Lean Manufacturing 4.0 of Polymeric Injection Molding Products**, Special Issue:International Conference on Design and Technologies for Polymeric and Composite Products - POLCOM 2019, Volume389, Issue1, 1900109; Published 20 February 2020, <https://doi.org/10.1002/masy.201900109>
2. D-S Ionel, C Gh Opran, B C Vălimareanu - **Lean Manufacturing 4.0 - dynamic physical and cybernetic system for Industry 4.0**, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 916, 012048, Published 2020, DOI 10.1088/1757-899X/916/1/
3. Ionel R. Dănuț-Sorin, Constantin Gheorghe Opran, Giuseppe Lamanna - **Lean 4.0 Dynamic Tools for Polymeric Products Manufacturing in Industry 4.0**, Special Issue:Progress on Polymers and Composites Products and Manufacturing Technologies — POLCOM 2020 Part II, Volume396, Issue1, 2000316; Published 16 April 2021, <https://doi.org/10.1002/masy.202000316>
4. R. Dănuț-Sorin Ionel, Giuseppe Lamanna, Constantin Gheorghe Opran - **Intelligent Link between Lean Manufacturing and the Cyber-Physical Industry 4.0 System**, Special Issue:Conference on Design and Technologies for Polymeric and Composites Products — POLCOM 2021, Volume404, Issue1, 2100478; Published 21 August 2022, <https://doi.org/10.1002/masy.202100478>
5. D-S Ionel and C Gh Opran - **Dynamic Lean 4.0 Cyber-Physical System for Polymeric Products Manufacturing in Industry 4.0**, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1182, 012030, Published 2021, DOI 10.1088/1757-899X/1182/1/012030