



UNIVERSITATEA
LUCIAN BLAGA
— DIN SIBIU —

Școala doctorală de Științe Inginerești și
Matematică

Domeniul de doctorat: Inginerie Industrială

TEZĂ DE DOCTORAT

**Cercetări privind aplicarea conceptului
Industry 4.0 în procesele de fabricație
industriale**

- REZUMAT -

Doctorand:

Ing. Claudiu-Damian PETRU

Conducător de doctorat:

Prof. Univ. Dr. Ing. Radu-Eugen BREAZ

SIBIU 2025



Cuprins (cuprinsul original al tezei)

<i>Introducere</i>	3
1.1 Justificarea alegerii temei	3
1.2 Obiectivele tezei de doctorat	5
<i>Stadiul actual privind conceptul Industry 4.0 în procesele de fabricație industriale</i>	6
2.1 Introducere	6
2.2 Tehnologiile care stau la baza conceptului Industry 4.0	7
2.3 Industry 4.0 în domeniul fabricației	9
2.4 Implementarea Industry 4.0: bariere și factori favorizanți	11
2.5 Gemeni digitali	12
2.5.1 Gemenii digitali în simulare	13
2.5.2 Gemenii digitali și sistemele ciber-fizice	14
2.5.3 Aplicații ale gemenilor digitali	15
2.6 Industry 5.0	16
2.7 Concluzii	18
<i>Cercetări privind aplicarea tehnicilor MCDM în aspecte legate de implementarea tehnologiilor Industry 4.0</i>	20
3.1 Introducere	20
3.2 Studiu privind selecția celei mai influente tehnologii Industry 4.0 din punct de vedere al proceselor de fabricație	20
3.3 Studiu privind selecția unei variante de robot industrial dintr-un set de alternative	27
3.3.1 Metoda BWM	29
3.3.2 Metoda TOPSIS	32
3.3.3 Aplicație	34
3.4 Concluzii	36
<i>Cercetări teoretice și experimentale privind dezvoltarea unor gemeni digitali pentru roboții industriali seriali</i>	39
4.1 Introducere. Robotul industrial KUKA KR6-2	39
4.2 Caracteristicile robotului KUKA KR6-2	40
4.3 Modelarea virtuală tridimensională a Robotului KUKA KR 6-2	42
4.4 Cinematica robotului KUKA KR 6-2	48
4.4.1 Rezolvarea problemei cinematice directe	49
4.4.2 Rezolvarea problemei cinematice inverse	52
4.5 Validarea ecuațiilor matematice caracteristice cinematicii robotului KUKA KR 6-2	56
4.5.1. Simulări ale cinematicii directe ale robotului KUKA KR6-2	57
4.5.2. Simulări ale cinematicii inverse ale robotului KUKA KR6-2	60
4.6 Modelul dinamic al robotului KUKA KR 6-2	62
4.7 Simulări virtuale ale robotului KUKA KR6-2 pentru operații de frezare	63
4.7.1 Analiza momentelor rezistente în cele nouă poziții	72

4.8 Componenta CAM a sistemului integrat de simulare CAE/CAM de tip geamă digital pentru robotul KUKA KR 6-2	74
4.9 Cercetări experimentale privind influența poziției semifabricatului asupra preciziei de prelucrare prin frezare	78
4.10 Concluzii	87
Cercetări teoretice și experimentale privind dezvoltarea unor gemeni digitali pentru sistemele CNC cu arhitectură deschisă	89
5.1 Introducere. Obiective	89
5.2 Structura sistemului CNC	90
5.3 Modelul matematic al sistemului de reglare automată a deplasării	92
5.4 Diagrama pentru studiul prin simulare a comportării sistemelor de control al deplasării	96
5.5 Acordarea preliminară a reguletoarelor de poziție	101
5.6 Studiul prin simulare al regimului de poziționare rapidă	105
5.7 Studiul prin simulare al regimului de conturare	113
5.8 Dezvoltarea unui mediu integrat de simulare CAE/CAM de tip geamă digital	121
5.8.1 Simulare CAE	121
5.8.2 Simulare CAM	126
5.8.3 Facilitățile oferite de mediul integrat de simulare CAE/CAM de tip geamă digital (digital-twin)	129
Concluzii generale, contribuții originale și direcții de cercetare viitoare	139
6.1 Concluzii generale	139
6.2 Contribuții	142
6.3 Direcții de cercetare viitoare	144
Bibliografie	145
Anexe	157

Introducere

1.1 Justificarea alegerii temei

Autorul acestei teze de doctorat a considerat că Industry 4.0 reprezintă un domeniu cu potențial ridicat pentru cercetare și dezvoltare, iar datorită pregătii sale ingineresti și experienței practice în domeniul sistemelor de fabricație, abordarea unei lucrări de cercetare avansată pe această temă are un potențial ridicat de a conduce la rezultate utile.

Astfel, după stabilirea tematicii de cercetare, autorul și-a planificat activitățile de cercetare conform schemei prezentate în figura 1.1:

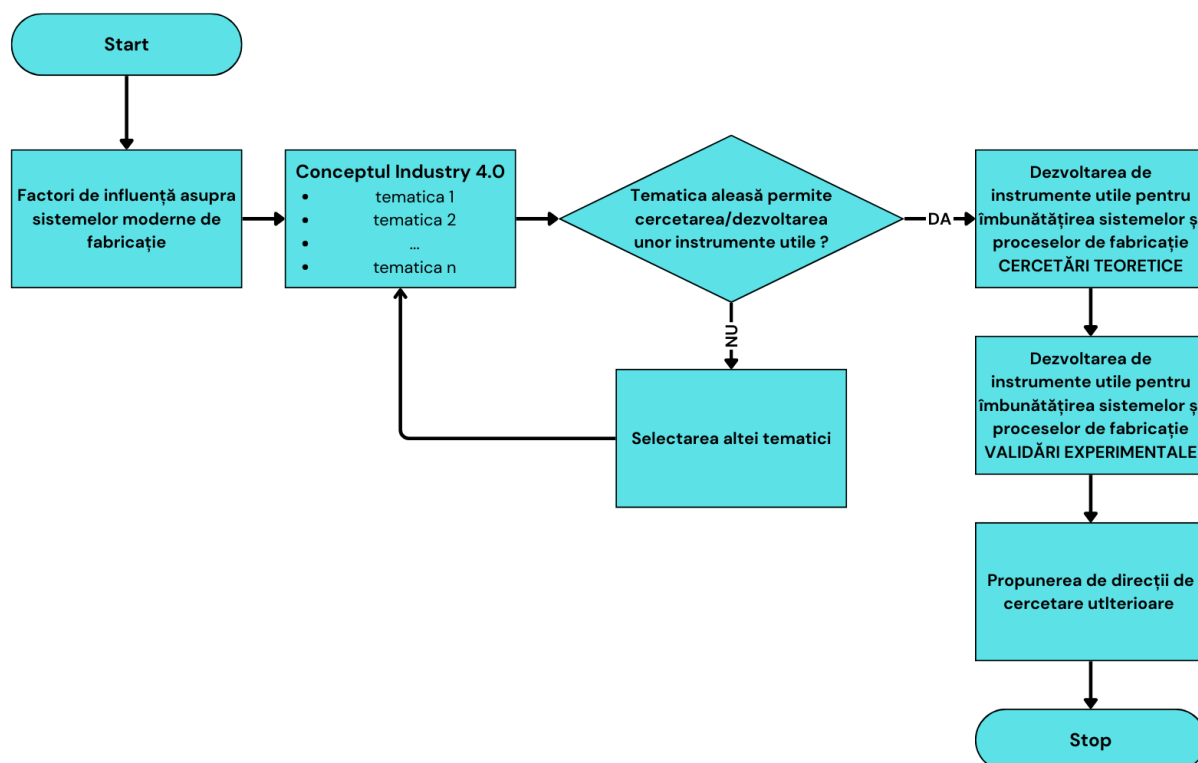


Fig. 1.1: Planificarea activităților de cercetare

Astfel, s-a stabilit că cercetările trebuie să abordeze principalii factori care influențează dezvoltarea sistemelor moderne de fabricație. În continuare, s-a decis că dintre acești factori conceptul Industry 4.0 să fie “nișa de cercetare” asupra căreia să se concentreze activitățile de cercetare în cadrul acestei teze de doctorat. S-a planificat sistematizarea conceptului pe tematici (s-a considerat că fiecare tehnologie componentă a Industry 4.0 reprezintă o tematică potențială), iar în urma unui proces de analiză și decizie multicriterială să selecteze o tematică cu potențial de dezvoltare a unor instrumente utile pentru comunitatea de utilizatori.

După ce tematica aleasă va permite acest lucru, se va trece la cercetarea și dezvoltarea unor instrumente utile, care să permită îmbunătățirea sistemelor de fabricație conform Industry 4.0 și să faciliteze implementarea în producție a acestui concept. Desigur, dezvoltarea va presupune derularea atât de cercetări teoretice, cât și de validări experimentale.

În final, teza de doctorat va trebui să se finalizeze cu stabilirea unor direcții de cercetare ulterioare finalizării acesteia.

1.2 Obiectivele tezei de doctorat

Pe baza planificării activităților de cercetare prezentată mai sus, au fost stabilite următoarele obiective ale tezei de doctorat:

- ✓ Realizarea unei analize critice ale stadiului actual privind conceptul Industry 4.0 în procesele de fabricație industriale, așa cum este reflectat în literatura de specialitate;
- ✓ Selectarea celei mai influente tehnologii dintre tehnologiile circumscrise conceptului Industry 4.0, printr-un proces de decizie multicriterială;
- ✓ Realizarea unor cercetări teoretice în scopul dezvoltării unor instrumente utile pentru îmbunătățirea sistemelor și proceselor de fabricație;
- ✓ Validarea experimentală a soluțiilor teoretice propuse;
- ✓ Stabilirea unor direcții de cercetare ulterioare finalizării tezei de doctorat.

Capitolul 2

Stadiul actual privind conceptul Industry 4.0 în procesele de fabricație industriale

2.1 Introducere

Dezvoltarea producției industriale, a industriei în general, s-a realizat în diverse etape, într-un proces evolutiv care continuă și în prezent. Astfel, atât din punct de vedere istoric, cât și științific, în prezent pot fi identificate cinci stadii, asociate cu așa-numitele “revoluții industriale”, sau conform clasificărilor din literatura internațională, asociate cu denumirile specifice “Industry” și cifre de la 1 la 5, conform figurii 2.1, adaptată după [JAN 23].

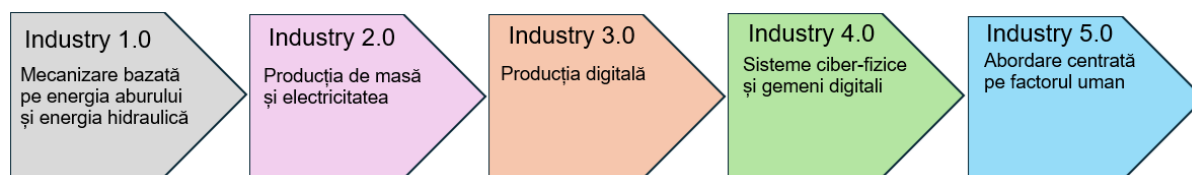


Fig. 2.1: Stadiile de evoluție a producției industriale (adaptată după [JAN 23])

Astfel, conceptul Industry 1.0 este asociat revoluției industriale începute la mijlocul secolului al 18-lea în Anglia [LUK 15], care înlocuiește producția bazată exclusiv pe munca manuală cu primele sisteme mecanizate, bazate în principal pe energia produsă de aburi.

Cea de-a doua revoluție industrială (Industry 2.0) a fost asociată cu utilizarea pe scară largă a sistemelor de acționare industriale bazate pe energia electrică și trecerea la producția de masă odată cu apariția liniilor (benzilor) de montaj. Din punct de vedere cronologic această etapă este încadrată între sfârșitul secolului al 19-lea și anii '80 ai secolului 20 [YIN 17].

Cea de-a treia revoluție industrială, asociată conceptului Industry 3.0, a implicat trecerea de la sistemele de acționare și comandă analogice la cele digitale. Astfel, etapa este asociată cu introducerea pe scară largă a automatelor programabile, a echipamentelor de comandă numerică digitale (mașini-unelte cu comandă numerică) și a roboților industriali. Sistemele de producție trec în această fază de la organizarea sub formă de linii de montaj la organizarea în celule sau sisteme flexibile de fabricație. Unii autori [YIN 17] consideră că acest stadiu de evoluție a început în anii '70 ai secolului 20, în timp ce alții consideră că etapa a început de asemenea în secolul 20, dar în anii '50 ai acestuia [JIA 21]. Desigur, toți autorii sunt de acord cu faptul că din punct de vedere cronologic această etapă nu poate fi considerată încheiată, aflându-se în desfășurare și în prezent.

Conceptul “Industry 4.0” a fost introdus în Germania în anul 2011 [ZHO 17], [FRA 19], și are ca element central fabricația inteligentă, bazată pe tehnologii cum ar fi sistemele ciber-fizice și gemenii digitali.

Deși considerată inițial ca o nouă revoluție industrială, etapa “Industry 5.0” a fost acceptată în prezent de majoritatea autorilor [MUK 23], [GHO 24], ca o politică cadru, bazată pe rezultatele obținute prin aplicarea conceptelor “Industry 4.0”, pe baza căreia se stabilesc strategii și reglementări care controlează progresul etapei anterioare, “Industry 4.0”. În principiu, “Industry 5.0” integrează conceptele anterioare cu o abordare centrată pe factorul uman.

2.2 Tehnologiile care stau la baza conceptului Industry 4.0

O analiză critică a literaturii de specialitate indică următoarele tehnologii care stau la baza conceptului Industry 4.0:

- 1. Prelucrarea și analiza unor cantități mari de date** (Big Data Analytics)
- 2. Automatizarea și utilizarea roboților industriali** (Automation and industrial robots)
- 3. Internetul industrial al obiectelor** (IoT - Industrial Internet of Things)
- 4. Inteligența artificială** (AI - Artificial intelligence)
- 5. Blockchain** (s-a preferat păstrarea termenului internațional în locul unei traduceri)
- 6. Modelarea și simularea prin utilizarea gemenilor digitali** (Digital twins)
- 7. Realitatea augmentată și virtuală** (Augmented and virtual reality)
- 8. Sisteme ciber-fizice** (CPS - Cyber-physical systems)
- 9. Fabricația aditivă** (additive manufacturing)
- 10. Cloud computing** (și în acest caz s-a preferat utilizarea termenului internațional în locul unei traduceri)
- 11. Securitatea cibernetică** (cyber-security)

În tabelul 2.1 sunt sintetizate aceste tehnologii, precum și o parte din referințele bibliografice din literatura de specialitate care justifică stabilirea acestora ca tehnologii-cheie sau “piloni” pe care se bazează Industry 4.0

2.7 Concluzii

Capitolul al doilea al acestei teze de doctorat a fost structurat conform diagramei prezentate în figura 2.2. Astfel, în prima parte a capitolului s-a prezentat evoluția cronologică a așa-numitelor “revoluții industriale”, prezentându-se de asemenea principalele concepte centrale din spatele fiecăreia.

În următorul subcapitol au fost sistematizate principalele tehnologii care stau la baza conceptului Industry 4.0, așa cum sunt ele prezentate în literatura de specialitate. O parte dintre tehnologiile identificate au fost supuse apoi în capitolul al treilea al acestei teze unui proces de analiză multicriterială, care a indicat faptul că tehnologia cea mai influentă din punctul de vedere al sistemelor de fabricație este cea a gemenilor digitali. Ulterior au fost identificate particularitățile conceptului Industry 4.0 aplicat în domeniul sistemelor de fabricație.

Subcapitolul următor a urmărit stabilirea factorilor care favorizează implementarea conceptului Industry 4.0, precum și a barierelor care împiedică sau întârzie această implementare.

Ca urmare a rezultatului analizei multicriteriale amintite mai sus, următorul subcapitol a prezentat o analiză a rezultatelor cercetărilor de specialitate în domeniul tehnologiei gemenilor digitali.

În ultimul subcapitol al prezentului capitol s-au evidențiat diferențele dintre cele două concepte, Industry 4.0 și Industry 5.0 și s-a evidențiat faptul că Industry 5.0 nu reprezintă de fapt o continuare cronologică sau o alternativă la Industry 4.0, ci o completare și o extindere, care pune în centrul conceptului factorul uman.

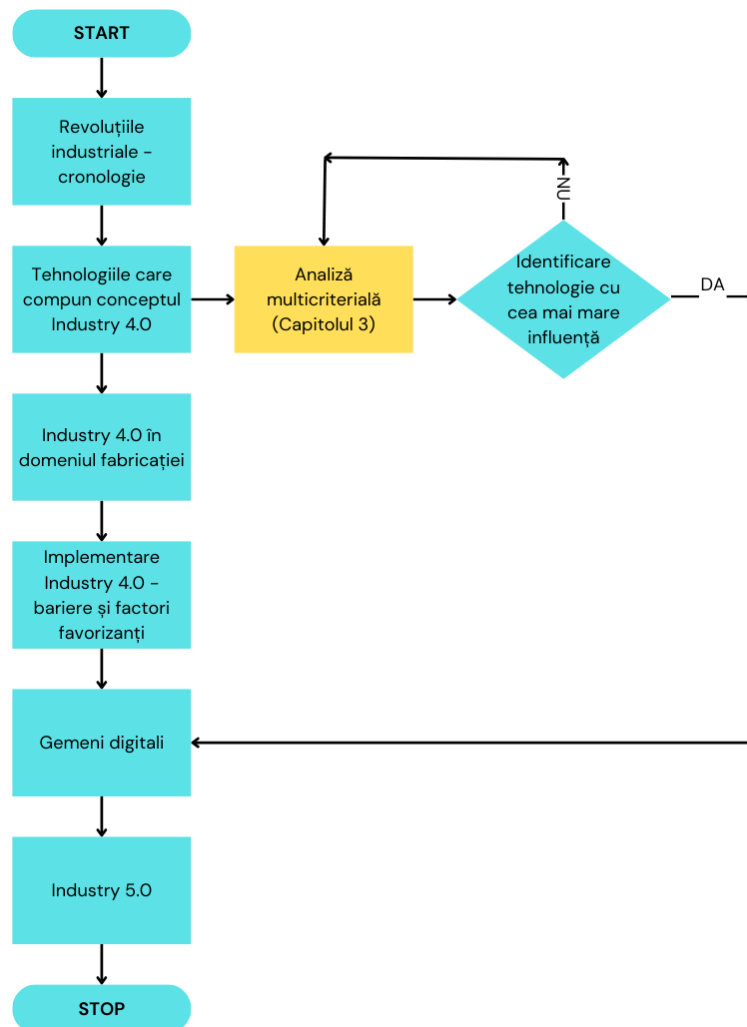


Fig. 2.2: Structura capitolului

Capitolul 3

Cercetări privind aplicarea tehnicilor MCDM în aspecte legate de implementarea tehnologiilor Industry 4.0

3.1 Introducere

Tehnicile de luare a deciziilor prin evaluare a multor criterii (multicriteriale), sau Multi Criteria Decision Making (MCDM), cum sunt cunoscute în literatura internațională, reprezintă un instrument eficient și folosit pe scară largă în multe domenii. În cadrul acestui capitol se propune aplicarea tehnicilor MCDM pentru două tipuri de aplicații:

- selecția celei mai influente tehnologii Industry 4.0, aflată în strânsă legătura cu procesele de fabricație;
- selecția celei avantajoase variante de robot industrial.

3.4 Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost cercetate aplicații ale metodelor de decizie multicriterială (MCDM) în contextul tehnologiilor și conceptelor asociate cu Industry 4.0.

Astfel, o primă aplicație a urmărit selectarea celei mai influente tehnologii asociate cu Industry 4.0, aplicabilă în cazul concret al sistemelor de fabricație. S-a optat pentru utilizarea

tehnicii AHP și s-a stabilit un set de criterii de selecție pe baza cărora au fost analizate alternativele (fig. 3.1).

Aplicarea metodei propuse a condus la identificarea tehnologiei de **Simulare prin utilizarea gemenilor digitali (SGD)** ca având cea mai mare influență în acest context.

Acest lucru a contribuit hotărâtor la decizia de a orienta cercetările prezentate în cadrul următoarelor capitole ale acestei teze de doctorat înspre dezvoltarea unor medii integrate de simulare de tip gemeni digitali (digitali twins) pentru roboți industriali și echipamente tehnologice de prelucrare cu comandă numerică.

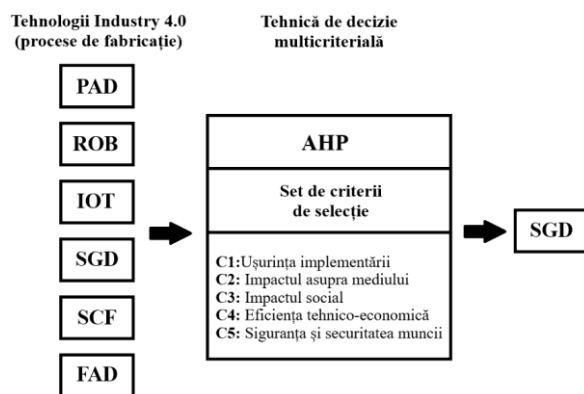


Fig. 3.1: Aplicația bazată pe AHP

Cea de-a doua aplicație propusă a prezentat o metodă de selecție bazată pe o combinație a tehnicilor MCDM BWM și TOPSIS, utilizate pentru selectarea celei mai bune variante dintr-un set de soluții alternative de structuri robotice seriale cu șase grade de libertate (fig. 3.2). S-a arătat că atât aplicarea tehnicii BWM, cât și a unei tehnici combinate TOPSIS și BWM au indicat în final aceeași soluție.

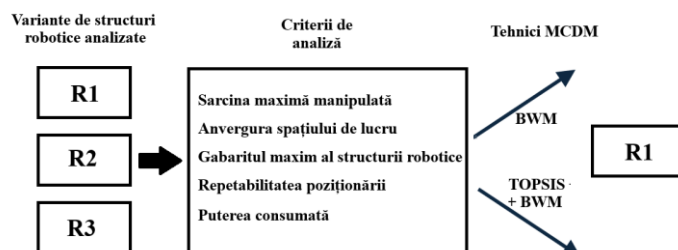


Fig. 3.1: Aplicația bazată pe BWM și TOPSIS

Capitolul 4

Cercetări teoretice și experimentale privind dezvoltarea unor gemeni digitali pentru roboții industriali seriali

4.1 Introducere. Robotul industrial KUKA KR6-2

Capitolul propune o metodologie detaliată pentru dezvoltarea unui **geamăn digital** (digital twin) al robotului KUKA KR 6-2.

4.8 Componenta CAM a sistemului integrat de simulare CAE/CAM de tip geamăn digital pentru robotul KUKA KR 6-2

Pornind de la modelul 3D al robotului KUKA KR 6-2 s-a urmărit dezvoltarea unui model cinematic, integrat într-un pachet software CAM care să permită simularea mișcărilor

robotului în timpul operațiilor de prelucrare. S-a optat pentru pachetul software ENCY [WWW 4], unde, utilizând modulul MachineMaker s-a construit modelul cinematic al robotului KUKA KR 6-2. În figura 4.1 este prezentată o captură de ecran din MachineMaker, în care se pot observa componentele modelului cinematic

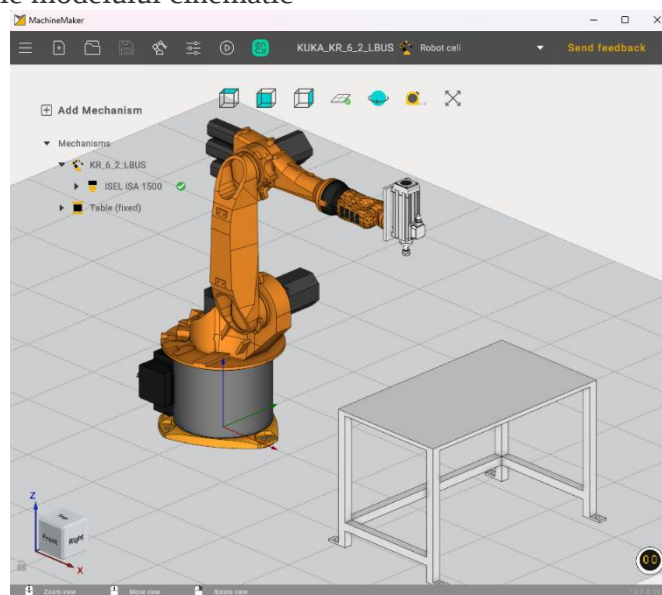


Fig. 4.1: Componentele modelului cinematic CAM al robotului KUKA KR 6-2 în modulul software MachineMaker

După dezvoltarea modelului cinematic al robotului KUKA KR 6-2 în modulul MachineMaker, acesta poate fi utilizat în pachetul software CAM ENCY, figura 4.2. Acest model permite vizualizarea mișcărilor robotului în timp ce se execută mișcările necesare prelucrării piesei prin frezare, sub comanda programului generat în ENCY.

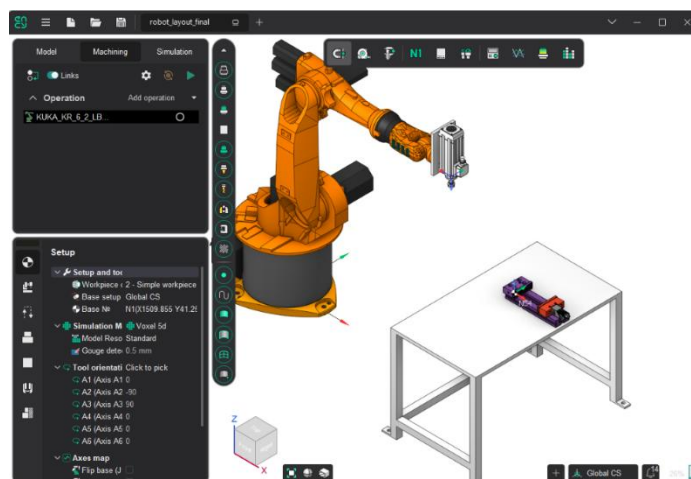


Fig. 4.2: Modelul cinematic al robotului în pachetul software CAM ENCY

Prin combinarea facilităților oferite de modelul realizat în Simulink – Simscape, cu cele oferite de modelul cinematic integrat în pachetul software ENCY, se poate afirma că s-a obținut un mediu integrat de simulare CAE/CAM a comportării robotului industrial KUKA KR 6-2, de tipul unui geamăn digital.

Conform sintezei grafice prezentate în figura 4.3, acest geamăn digital permite introducerea sub formă de date de intrare a traiectoriilor de lucru (sub formă de cinematică inversă), a modelului 3D al piesei, precum și a regimului de aşchiere. Informațiile pe care le furnizează, sub formă de ieșiri sunt:

- date despre modul în care este solicitată structura robotică în timpul desfășurării procesului de prelucrare;

- date privind influența parametrilor de reglaj asupra structurilor de control al mișcării de tip axă robotică;
- date privind valorile unghiurilor din articulații în timpul procesului de prelucrare (cinematica directă);
- generarea programului sub formă de cod numeric specific tipului de robot utilizat, în cinematică inversă (care constituie de asemenea dată de intrare în componenta CAE a geamănului digital), în condițiile evitării punctelor de singularitate;
- simularea realistă a procesului de prelucrare (mișcări, vizualizarea îndepărtării materialului, evitarea coliziunilor) cu luarea în considerare a tuturor componentelor procesului tehnologic (robot, unitate de lucru, dispozitive de fixare, semifabricat, scule așchietoare).

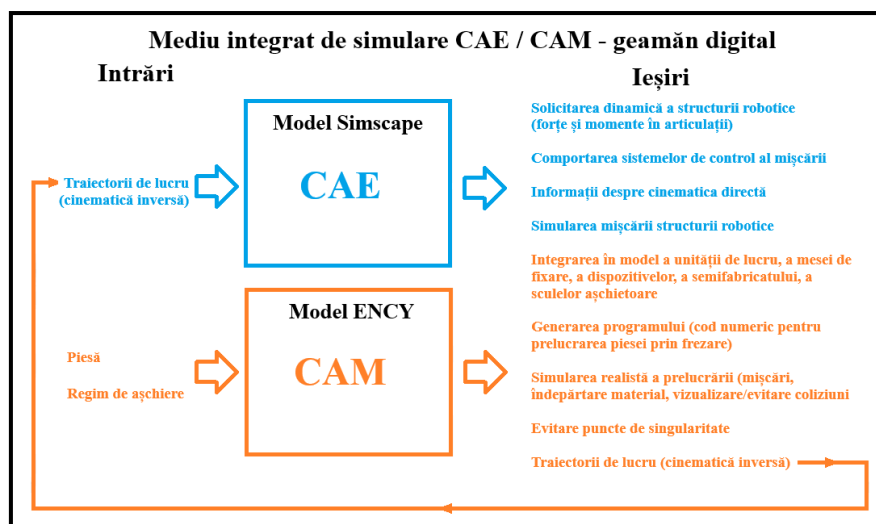


Fig. 4.3: Sintează grafică a facilităților oferite de sistemul de simulare integrată CAE / CAM de tip geamăn digital pentru robotul KUKA KR 6-2

Este de remarcat faptul că cele două componente (CAE și CAM) ale geamănului digital se completează armonios și oferă utilizatorului atât informații, cât și mijloace de îmbunătățire a performanțelor sistemului tehnologic de prelucrare prin frezare utilizând robotul industrial.

Utilizarea de exemplu numai a componentei CAM permite prelucrarea unei piese, dar, deoarece utilizatorul nu dispune în acest caz de informațiile oferite de componenta CAE, nu se poate garanta că solicitările dinamice ale structurii robotice (influențate și de poziționarea semifabricatului în spațiul de lucru al robotului) nu influențează precizia de prelucrare, sau, nu conduc chiar la deteriorarea structurii robotului.

4.9 Cercetări experimentale privind influența poziției semifabricatului asupra preciziei de prelucrare prin frezare

Pe baza concluziilor stabilite în paragrafele anterioare, s-a trecut la prelucrarea unei piese, pentru patru poziții diferite ale semifabricatului în spațiul de lucru al robotului industrial KUKA KR 6-2, conform figurii 4.4.

Prelucrarea propriu-zisă presupune frezarea unui buzunar circular cu diametrul $\varnothing 24$ mm, cu o adâncime de 3 mm.

Datorită limitărilor fizice ale standului experimental nu a fost posibilă plasarea semifabricatului exact în pozițiile considerate în paragraful anterior, dar s-a urmărit:

- modificarea cotei X pentru a crește valoarea momentului M_{r1} (două poziții diferite ale cotei X pentru aceeași cotă Z)
- modificarea cotei Z (două poziții diferite ale cotei Z pentru aceeași cotă X)

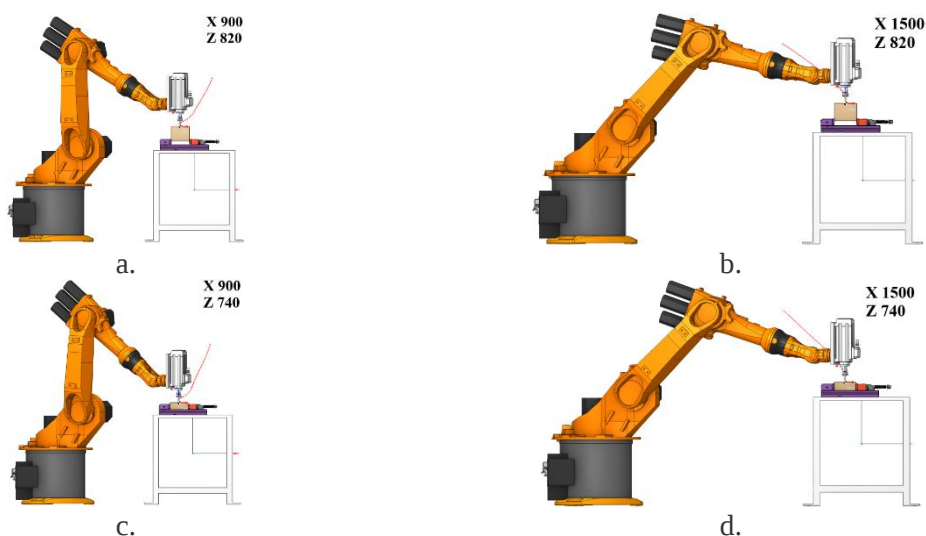


Fig. 4.4: Pozițiile semifabricatului pentru testarea experimentală a preciziei de poziționare (a-d)

Standul experimental pe care au fost realizate testele este prezentat în figura 4.5

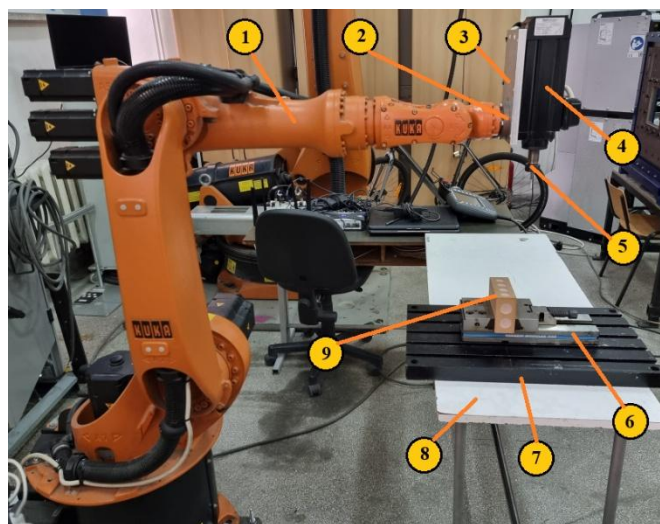


Fig. 4.5: Standul experimental cu identificarea principalelor componente

Notațiile din figura 4.5 reprezintă:

- 1 – robotul industrial KUKA KR 6-2;
- 2 – flanșa suplimentară care face legătura între a șasea axă a robotului și placa de legătură;
- 3 – placa de legătură utilizată pentru prinderea unității de lucru (motor + port-sculă);
- 4- motorul electric ISEL ISA 1500 de acționare al sculei;
- 5 – port-sculă + sculă;
- 6 – dispozitiv de fixare al piesei (menghină);
- 7 – masă cu canale T;
- 8 – masă de susținere cu poziție reglabilă (mobilă)
- 9 – piesă.

În figura 4.6 este prezentată o imagine cu mai multe buzunare de acest tip prelucrate.



a.

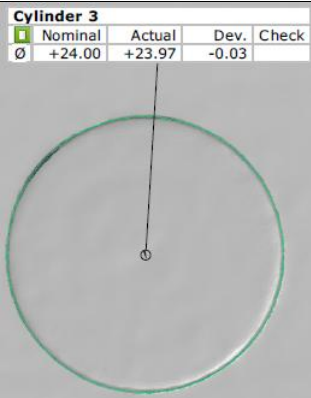
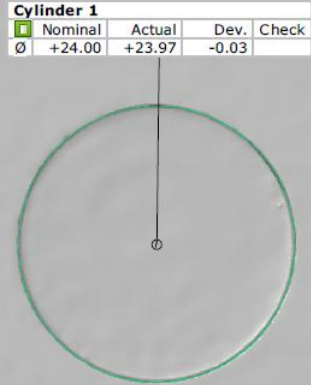
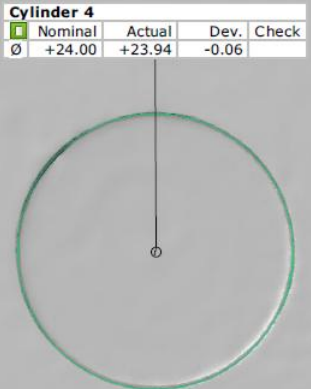
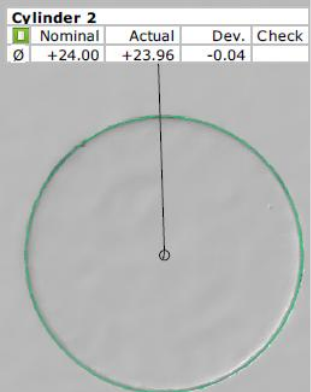


b.

Fig. 4.6: Semifabricat (a) și piese prelucrate (b)

Măsurarea pieselor prelucrate s-a realizat cu dispozitivul de măsurare GOM Atos Core 200, iar pentru prelucrarea și vizualizarea datelor a fost utilizat pachetul software GOM Inspect Suite 2020. Măsurătorile au vizat abaterea de la cota nominală de 24 mm a diametrului fiecărui buzunar circular. Rezultatele privind abaterile de diametru sunt prezentate în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1: Abaterea de la valoare nominală a diametrului

Nr. crt.	Poziția piesei [mm]	Prezentare grafică (captură de ecran din GOM Inspect Suite 2020)	Abatere [mm]
1.	X 900 Z 820		-0.03
2.	X 1500 Z 820		-0.03
3.	X 900 Z 740		-0.06
4.	X 1500 Z 740		-0.04

Din tabelul 4.1 se poate remarca faptul că rezultatele experimentale confirmă în mare măsură concluziile simulărilor privind cele mai favorabile și cele mai defavorabile poziții ale semifabricatului, sintetizate anterior. Trebuie precizat aici că abaterile măsurate sunt relativ mici pentru un sistem de acest tip și datorită faptului că, dată fiind rigiditatea redusă a sistemului experimental s-a optat pentru un regim de așchiere cu valori reduse ale adâncimii de așchiere (1 mm / trecere) și ale vitezei de avans (200 mm/min). Scula așchietoare utilizată a fost o freză cilindro-frontală (freză deget), din oțel rapid, cu diametrul $\varnothing$ 6 mm. Turația sculei a fost de 2000 rot/min, corespunzând unei viteze de așchiere de 37,7 m/min.

4.10 Concluzii

În cadrul acestui capitol s-a prezentat dezvoltarea unui mediu integrat de simulare CAE/CAM de tip geamăn digital (digital twin) pentru robotul KUKA KR6-2, având ca scop analiza și optimizarea comportamentului acestuia în cadrul proceselor de fabricație.

Dezvoltarea acestui model virtual a permis evaluarea cinematică și dinamică a robotului, precum și determinarea forțelor rezistente și a momentelor rezistente la nivelul cuplelor cinematice, în timpul unui proces de frezare. Metodologia aplicată a inclus modelarea tridimensională, integrarea în mediul Simulink-Simscape pentru simulare și analiza parametrilor cinematici și dinamici relevanți.

Analiza cinematică a inclus rezolvarea problemelor de cinematică directă și inversă, determinând poziția și orientarea efectorului final în raport cu mișcările de la nivelul articulațiilor robotului. Validarea ecuațiilor matematice utilizate a fost realizată prin simulări în Simulink, confirmând fidelitatea modelului virtual în raport cu comportamentul real al robotului. Pe baza acestor rezultate, a fost posibilă evaluarea dinamicii sistemului și identificarea momentelor rezistente în diferite configurații.

Pentru a optimiza procesul de frezare, s-au efectuat simulări în care semifabricatul a fost poziționat în nouă configurații diferite, analizându-se momentele rezistente și impactul acestora asupra consumului energetic și preciziei prelucrării. Rezultatele au evidențiat faptul că poziția optimă a semifabricatului, în care momentele rezistente sunt minime și consumul energetic este redus, se regăsește în zona $X = 900$ mm și Z între 750 mm și 1000 mm. Această configurație permite o distribuție echilibrată a solicitărilor asupra articulațiilor robotului, reducând uzura și asigurând o prelucrare mai stabilă.

Simulările realizate au demonstrat importanța utilizării unui model digital avansat pentru optimizarea proceselor de fabricație asistate de roboți industriali. Implementarea unui geamăn digital (digital twin) pentru robotul industrial KUKA KR6-2 poate contribui semnificativ la reducerea consumului energetic, îmbunătățirea preciziei și creșterea durabilității echipamentului, facilitând astfel utilizarea robotului și integrarea acestuia în diferite medii de producție. Rezultatele obținute confirmă faptul că abordarea bazată pe simulări digitale oferă un instrument valoros pentru analiza și optimizarea sistemelor robotice, permițând dezvoltarea unor strategii eficiente de control, programare și operare.

Completarea modelului CAE cu modelul cinematic CAM realizat în pachetul software ENCY a permis introducerea facilităților de generare a codului numeric de control al mișcării structurii robotice pentru diverse aplicații, vizualizarea mișcărilor și evitarea coliziunilor, precum și evitarea punctelor de singularitate.

Integrarea CAE/CAM permite de asemenea studiul dinamic al solicitărilor din cuplele (articulațiile robotului) pentru un program (set de traiectorii) generat de pachetul software CAM, facilitare care nu este disponibilă în pachetele CAM uzuale.

Rezultatele și concluziile obținute pe baza simulărilor facilitate de utilizarea mediului integrat de simulare CAE/CAM au fost ulterior validate în mare măsură prin derularea unui program de determinări experimentale, în cadrul căruia au fost prelucrate prin frezare piese situate în diferite poziții în spațiul de lucru al robotului.

Cercetări teoretice și experimentale privind dezvoltarea unor gemeni digitali pentru sistemele CNC cu arhitectură deschisă

5.1 Introducere. Obiective

Sistemele CNC cu arhitectură deschisă permit realizarea unor cercetări privind îmbunătățirea comportării acestora. Caracterul deschis al acestor sisteme permite intervenția utilizatorului asupra modulelor componente, fie hardware, fie software, cu consecințe directe asupra performanțelor. Cercetările întreprinse în cadrul acestui capitol au avut următoarele obiective:

- Structurarea unui sistem CNC modular, cu arhitectură deschisă;
- Îmbunătățirea comportării dinamice și a preciziei de prelucrare a sistemului CNC, pentru al aduce sistemul la nivelul de performanță al unui echipament de prelucrare prin frezare destinat prelucrării unor materiale cu rezistență la rupere mică;
- Realizarea unui mediu integrat de simulare CAE/CAM care să permită să permită studiul comportării sistemului CNC, la nivelul unui geamăn digital.

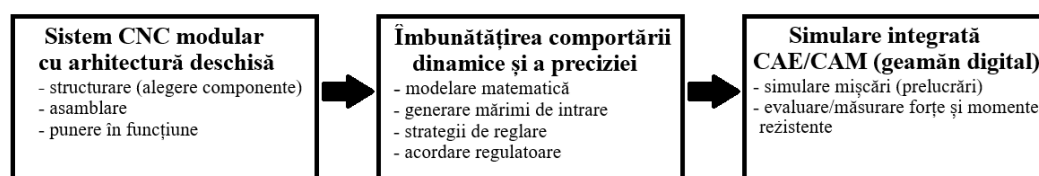


Fig. 5.1: Obiectivele cercetării

5.2 Structura sistemului CNC

Sistemul CNC cu arhitectură deschisă, structurat sub forma unei mini-mășini de frezat cu comandă numerică, cu trei axe (X, Y, Z), este prezentat în figura 5.2 a, b, c.

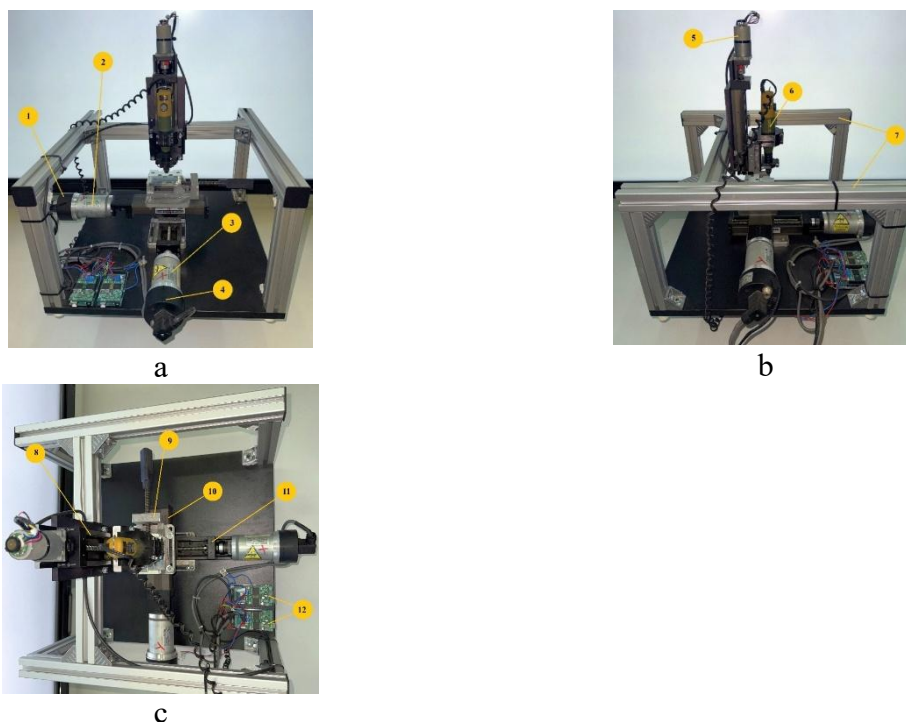


Fig. 5.2: Sistemul CNC cu arhitectură deschisă

Notățiile din figura 5.2 reprezintă

- 1 – traductorul incremental (encoderul) axei Y
- 2 – servomotorul de c.c. al axei Y
- 3 – servomotorul de c.c. al axei X
- 4 – traductorul incremental (encoderul) axei X
- 5 – servomotorul de c.c. al axei Z
- 6 – unitate arbore principal
- 7 – structură portantă (batiu)
- 8 – sistemul de transmisie al axei Z
- 9 – sistemul de fixare al semifabricatului
- 10 – sistemul de transmisie al axei Y
- 11 – sistemul de transmisie al axei X
- 12 – plăcile de comandă Arduino împreună cu plăcile de alimentare a motoarelor de c.c.

Așa după cum se poate observa din figura 5.2, sistemul este realizat în formă modulară, principalele module fiind următoarele:

Structura portantă (batiul): este realizată din profile extrudate din aluminiu, fixate de o placă de bază.

Modulele de acționare ale celor trei axe/sisteme de avans (X, Y, Z): sunt realizate sub formă de sisteme de reglare automată a deplasării. Acestea includ servomotoare de curent continuu Dunkermotoren GR63x25ca elemente de execuție și traductoare fotoelectrice numerice incrementale (encodere) pe bucla de reacție.

Modulul de tip unitate de lucru (arbore principal): este realizat prin integrarea unei mini-mașini de găurit Proxxon și include un sistem de acționare bazat pe motor de curent alternativ monofazat (cu posibilitatea de reglare manuală a turației) și un sistem de prindere a sculei așchietoare.

Modulul de fixare a semifabricatului: este realizat sub forma unui dispozitiv de tip menghină, care permite fixarea manuală a semifabricatului.

Modulul de comandă și control: Comanda și controlul sistemului este realizată cu ajutorul a două plăci Arduino MEGA, echipate cu microcontrollere de tip AVR ATmega 2560, pe 8 biți. De asemenea, din structura modulului de comandă și control fac parte și plăcile Pololu Dual VNH5019 (drive), care asigură alimentarea servomotoarelor de c.c. cu tensiuni cuprinse între 5.5-24 V și curenți între 12-24 A. Fiecare dintre aceste două drive poate alimenta până la două servomotoare de c.c. și sunt compatibile cu plăcile Arduino MEGA

5.7 Studiul prin simulare al regimului de conturare

Regimul de mișcare în care au loc deplasări simultane pe mai multe axe de mișcare, iar în timpul acestor deplasări se execută operații de prelucrare (așchiere), poartă numele de regim de conturare. Așa după s-a precizat mai sus, un contur în plan (planul XY pentru cazul studiat) este generat prin descompunerea acestuia în entități de tip segmente de dreaptă și arce de cerc.

Astfel, echipamentele NC generează comenzi de deplasare, simultan după mai multe axe, prin rularea algoritmilor de interpolare. Există două categorii de algoritmi de interpolare, în funcție de traiectoria elementară generată, segment de dreaptă sau arc de cerc, algoritmi de interpolare liniară, respectiv algoritmi de interpolare circulară. De asemenea, în cadrul celor două categorii există mai multe tipuri de algoritmi.

În figura 5.3 este prezentată diagrama de simulare utilizată pentru generarea mărimilor de intrare de referință x_{imp} și y_{imp} pentru algoritmul de interpolare circulară. În figura 5.4 diagrama de mai sus a fost integrată într-un sistem care permite simularea funcționării sistemelor de control al deplasării pe axele X și Y în regim de conturare.

Simulările au urmărit studiul comportării echipamentului la generarea unui cerc complet în planul XY. În figura 5.5 sunt prezentate traiectoriile de tip cerc complet, impusă și efectivă, obținute prin simulare, în condițiile unor momente rezistente tehnologice de valoare zero (mers în gol). Se observă că la scara utilizată în figură, cele două traiectorii sunt practic suprapuse.

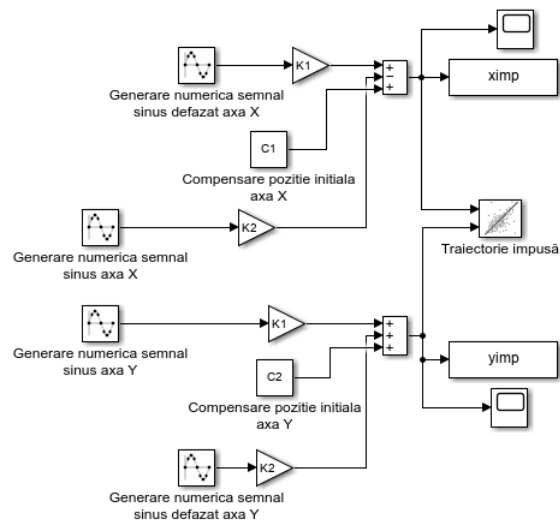


Fig. 5.3: Subsystemul care materializează algoritmul de interpolare circulară

În figura 5.6, în care este reprezentat un detaliu la scară din figura 5.3 se poate observa că există totuși unele abateri de conturare, pe axa X și pe axa Y, care, conform figurii sunt mai mici de 0.05 mm, ceea ce reprezintă o valoare acceptabilă pentru rolul și scopul sistemului propus.

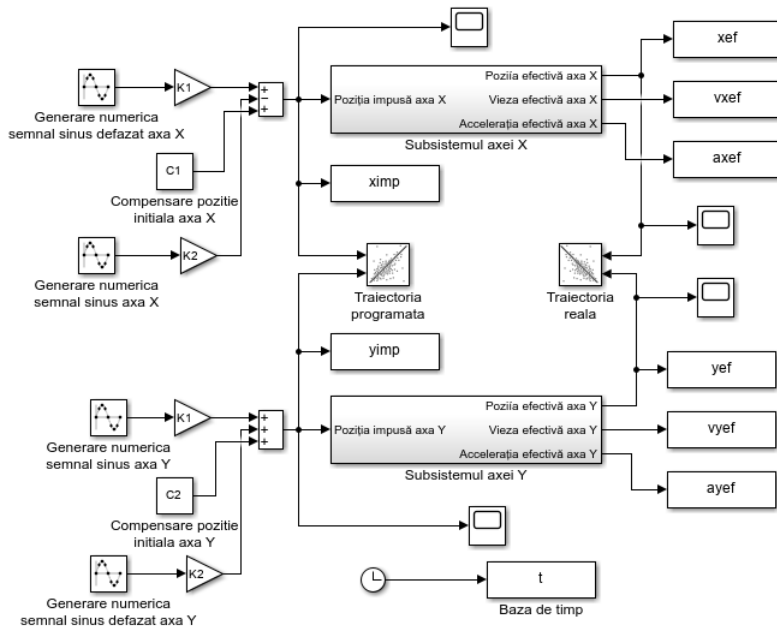


Fig. 5.4: Simularea sistemelor de control al deplasării pe axele X și Y în regim de conturare

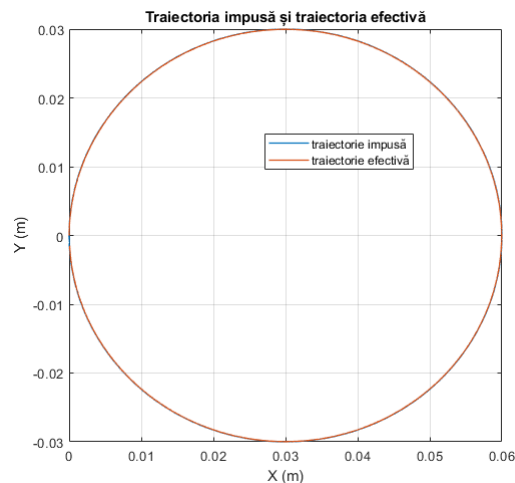


Fig. 5.5: Traectoria impusă și traectoria efectivă la mersul în gol

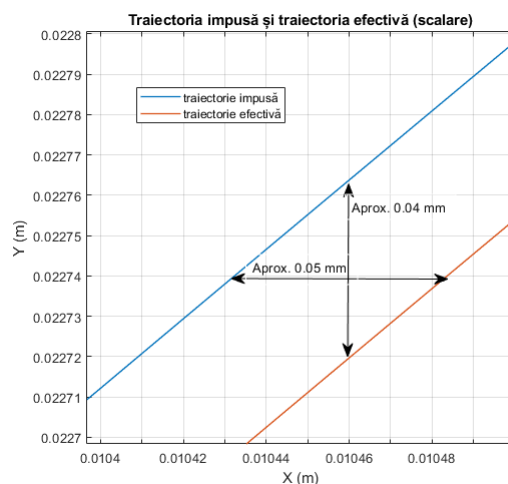
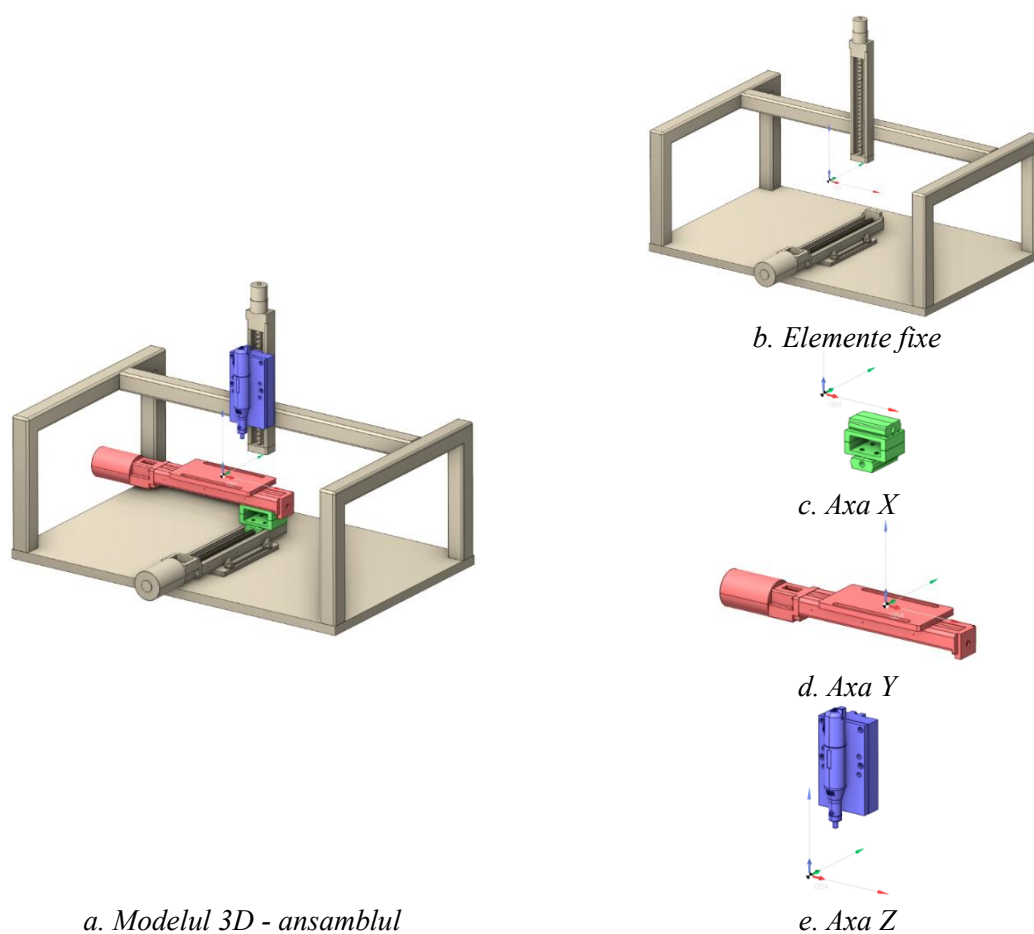


Fig. 5.6: Detaliu la scară din figura 5.32 cu indicarea abaterilor pe X și Y dintre traectoria impusă și traectoria efectivă (mers în gol)

5.8 Dezvoltarea unui mediu integrat de simulare CAE/CAM de tip geamăn digital

5.8.1 Simulare CAE

Utilizarea pachetului software Solidworks pentru realizarea modelului 3D sub formă de ansamblu, separat ulterior în module funcționale a fost necesară deoarece acesta este integrat direct cu MATLAB & Simulink, permițând generarea automată a unui model cinematic în acesta din urmă, prin exportul ansamblului 3D din Solidworks. În figura 5.7 este prezentat modelul 3D al echipamentului CNC, împreună cu modulele funcționale



a. Modelul 3D - ansamblul

Fig. 5.7: Modelul 3D al echipamentului CNC, împreună cu modulele funcționale

Exportul modelului 3D din Solidworks se face accesând meniul principal **Tools**, submeniul **Simscape Multibody Link**, submeniul **Export** și comanda **Simscape Multibody**.

În urma acestor comenzi se va genera un fișier cu extensia **.xml** (pentru cazul de față **cnc.xml**) care urmează a fi importat în spațiul de lucru MATLAB cu comanda:

```
smimport('cnc')
```

În urma importului se va genera un fișier Simulink (**cnc.slx**) și un fișier de date (**cnc_DataFile.m**).

Fișierul **cnc.slx** include toate informațiile necesare pentru simularea cinematică a echipamentului CNC modelat, utilizând Simulink și modulele acestuia **Simscape Multibody** sau **Simscape Multibody First Generation (Simmechanics)**, în funcție de versiunea MATLAB utilizată.

În această fază diagrama poate simula doar mișcările executate de echipamentul CNC, însă doar într-un mod necontrolat. Prin completarea diagramei cu sistemele de acționare a cuplelor cinematice și cu sistemele de generare a mărimilor de referință se obține diagrama din figura 5.8, care permite simularea comportării sistemului atât din punct de vedere cinematic, cât și dinamic.

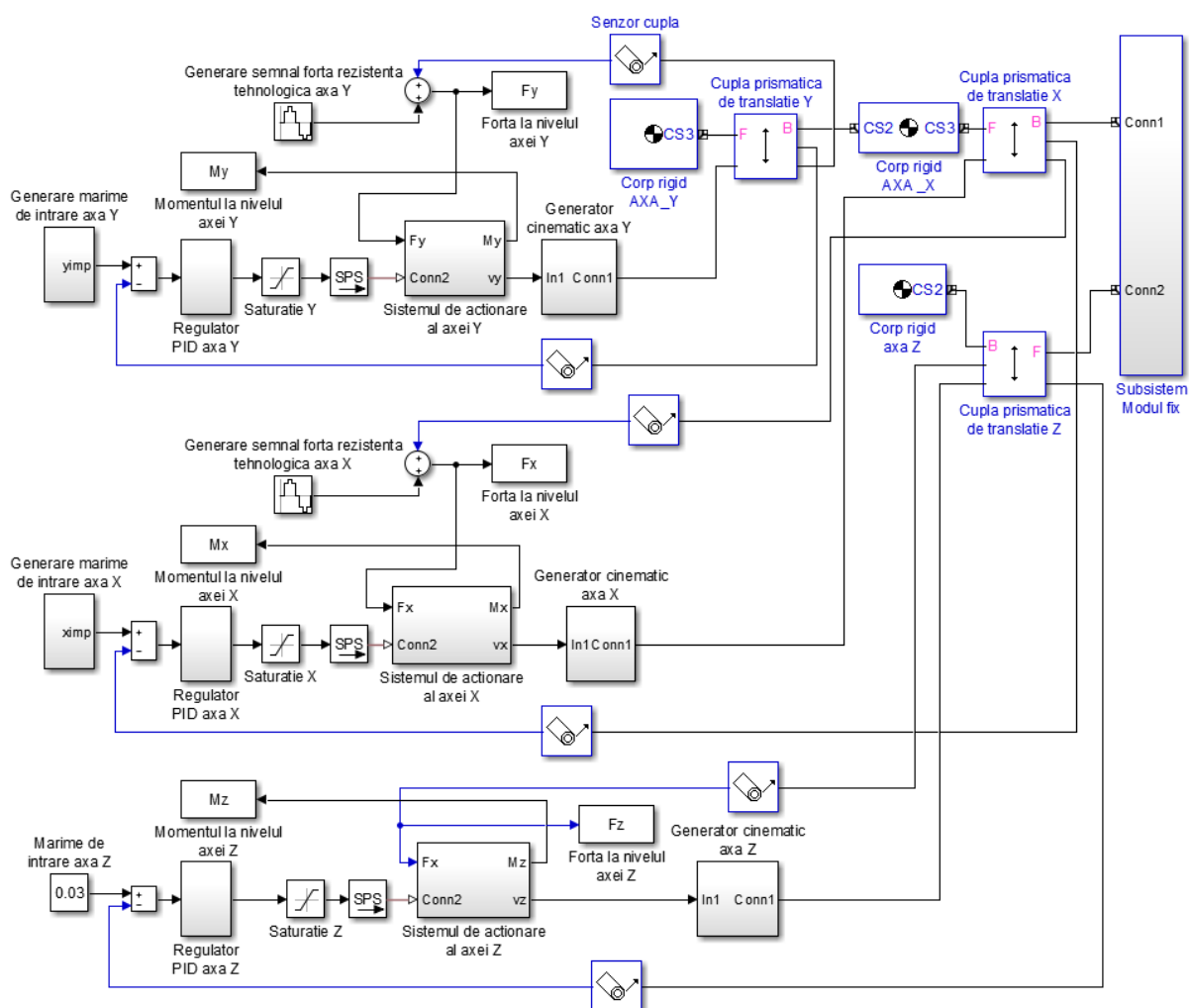


Fig. 5.8: Diagramă de simulare de tip geamă digital (digital twin) pentru echipamentul CNC

Blocurile care provin din modul **Simscape Multibody First Generation (Simmechanics)** au fost reprezentate cu linie albastră în figura 5.8.

Diagrama din figura 5.8 permite simularea mișcărilor echipamentului CNC, dar această simulare este una complexă: pe de o parte se introduc legile de mișcare care descriu deplasările elementelor mobile (în diferite regimuri de lucru, fie poziționare rapidă, fie conturare plană), pe altă parte, diagrama permite studiul efectele cauzate de dinamica sistemelor de acționare pentru fiecare axă asupra mișcărilor. Mai mult, diagrama permite studierea efectelor modificării parametrilor reguletoarelor automate asupra comportării sistemului, pentru fiecare axă. De asemenea, este permisă studierea efectelor forțelor și momentelor rezistente tehnologice, care pot fi introduse atât mărimi cu variații după o anumită lege de variație în timp (la nivelul superior al diagramei, utilizând subsistemele Generare forță rezistentă tehnologică), fie ca mărimi constante cu variație de tip treaptă (prin intermediul blocurilor de tip moment perturbator din subsistemele de acționare ale axelor).

În figura 5.9 este prezentată o captură de ecran din timpul simulării mișcării sistemului, în interfața **Mechanics Explorer**.

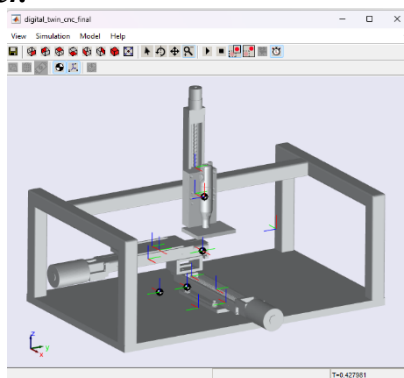


Fig. 5.9: Simularea mișcării sistemului în interfața **Mechanics Explorer**

5.8.2 Simulare CAM

Pentru ca sistemul integrat de simulare să permită și simularea CAM, s-a realizat construcția unui model cinematic pentru echipamentul CNC, utilizând modul MachineMaker din pachetul software CAM ENCY. În figura 5.10 este prezentată o captură de ecran din MachineMaker.

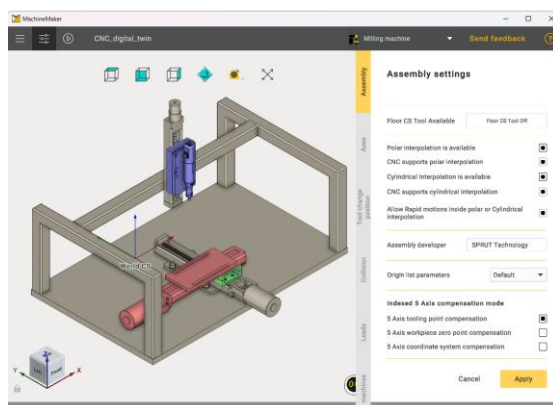


Fig. 5.10: Stabilirea proprietăților modelului cinematic în **MachineMaker**

După construcția modelului cinematic, acesta poate fi utilizat pentru simularea prelucrărilor în programul CAM ENCY. În figura 5.11 este prezentată o captură de ecran din acest program, în care se poate observa modul în care piesa de prelucrat a fost fixată pe mașină, precum și simularea prelucrării.

Se observă că procesul de simulare este unul complet, fiind simulate mișcările executate de sculă, cele executate de semifabricat și cele executate de elementele mobile ale mașinii.

De asemenea, este simulat și modul în care sculele îndepărtează materialului semifabricatului prin procedeul de frezare.

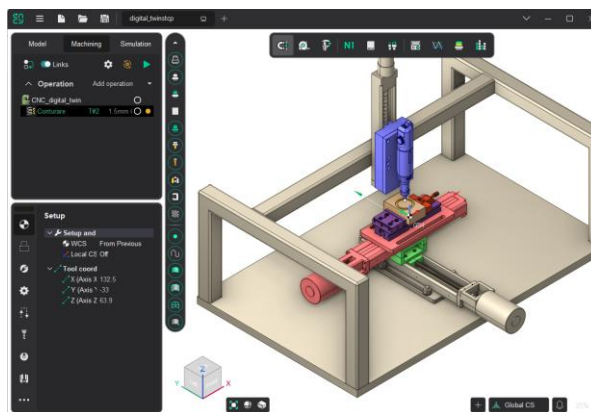


Fig. 5.11: Pregătirea prelucrării prin frezare în ENCY

5.8.3 Facilitățile oferite de mediul integrat de simulare CAE/CAM de tip geamă digital (digital-twin)

În paragrafele anterioare au fost descrise etapele parcurse pentru dezvoltarea sistemului integrat de simulare de tip geamă digital (digital-twin).

În tabelul 5.1 sunt descrise posibilitățile pe care acesta le oferă din punct de vedere al studiului prin simulare al comportării echipamentului CNC realizat.

Tabelul 5.3: Facilități oferite de mediul integrat de simulare de tip geamă digital (digital-twin)

Tip simulare	Obiectiv	Ce se poate simula / studia	Avantaje
Simulare CAE	Studiul comportării sistemelor de control al mișcării din structura echipamentului CNC	- comportarea dinamică a sistemelor de control al mișcării în diferite regimuri de funcționare (poziționare rapidă și conturare); - influența parametrilor de reglaj ai reguletoarelor asupra preciziei de poziționare și a preciziei de conturare; - stabilirea mărimilor de intrare impuse (deplasări, viteze accelerații); - valorile mărimilor care apar în sistem în timpul funcționării acestuia (tensiuni, curenți, forțe, momente, deplasări, viteze, accelerații); - vizualizarea mișcării elementelor mobile ale echipamentului și modul în care solicitările statice și dinamice influențează aceste mișcări.	Se pot acorda reguletoarele sistemelor de control al mișcării; Se poate îmbunătăți precizia de poziționare; Se poate îmbunătăți precizia de conturare; Se poate proiecta regimul de așchiere în funcție de precizia de prelucrare impusă; Se poate evita suprasolicitarea dinamică a echipamentului.
Simulare CAM	Studiul mișcării elementelor mobile ale	- modul de fixare a semifabricatului pe masa echipamentului (este	Pot fi identificate și eliminate coliziunile dintre sculă și semifabricat;

	echipamentului CNC în timpul prelucrării prin frezare a pieselor	simulată inclusiv menghina); - mișcarea sculei așchietoare; - mișcarea semifabricatului; - mișcarea elementelor mobile; - modul în care este îndepărtat materialul semifabricatului.	Pot fi identificate și eliminate coliziunile dintre sculă și sistemele de fixare a semifabricatului (menghină și/sau bride); Pot fi identificate eliminate coliziunile dintre elementele mobile ale mașinii; Pot fi identificate depășirile curselor maxime pe axele de mișcare ale echipamentului; Poate fi generat și verificat codul NC pentru prelucrarea pieselor;
--	--	--	--

5.9 Determinări experimentale

Așa cum s-a precizat în paragraful 5.1, comanda și controlul sistemului este realizată cu ajutorul a două plăci Arduino MEGA, echipate cu microcontrollere de tip AVR ATmega 2560 (fig. 5.12), pe 8 biți, împreună cu plăcile Pololu Dual VN5019 (fig. 5.13), care asigură alimentarea servomotoarelor de c.c. cu tensiuni cuprinse între 5.5-24 V și curenți între 12-24 A.



Fig. 5.12: Placa de dezvoltare Arduino MEGA [WWW 6]



Fig. 5.13: Placa de comandă a motoarelor Pololu Dual VN5019 [WWW 7]

Plăcile Pololu Dual VN5019 (cu rol de drivere de comandă a motoarelor de curent continuu) sunt conectate atât cu plăcile de dezvoltare Arduino, cât și cu motoarele pe care acestea le comandă.

Pentru realizarea controlului în buclă închisă, au fost utilizate traductoare numerice fotoelectrice (encodere) incrementale în quadratură. Rezoluția propusă pentru sistemul CNS a determinat numărul de impulsuri/rotatie necesar. Astfel, a fost utilizat encoderul Dunkermotoren (care echează motoarele) pentru axele X, Y, cu o rezoluție de 2048 impulsuri/rotatie, iar pentru axa Z, care în această etapă a dezvoltării sistemului este utilizată numai pentru poziționare, există posibilitatea citirii a 64 impulsuri/rotatie.

Pentru controlul mișcării pe axele X și Y ale sistemului CNC propus a fost utilizat pachetul software MATLAB-Simulink, împreună cu modulul suplimentar dedicat sistemelor bazate pe echipamente Arduino, Simulink Support Package for Arduino Hardware.

Pentru controlul în timp real al mișcărilor pe axele X și Y s-a utilizat diagrama prezentată în figura 5.14.

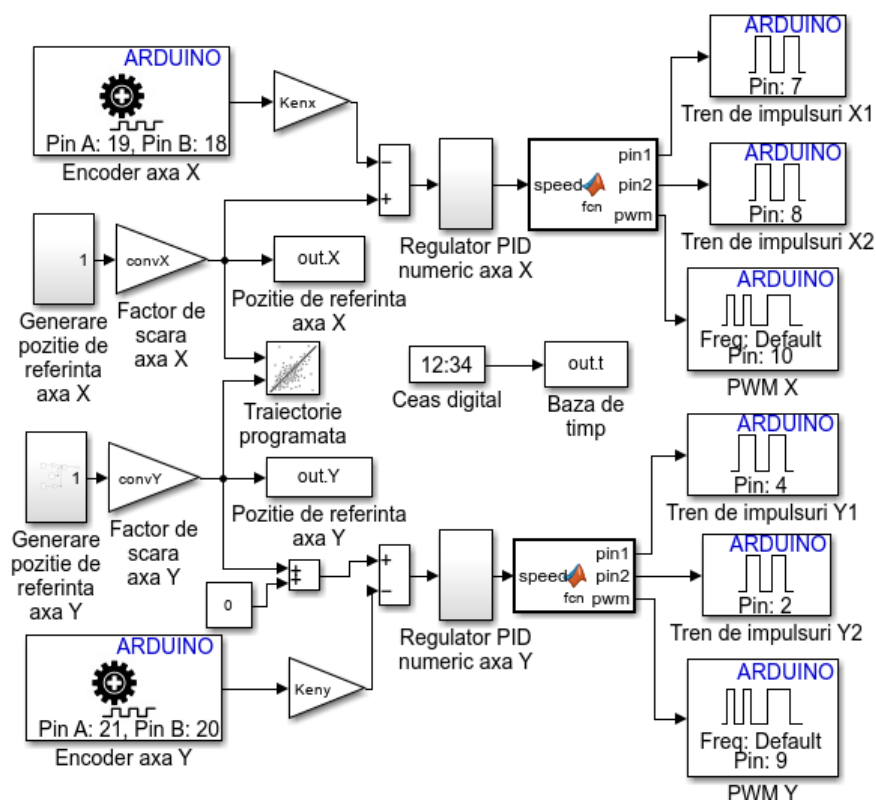


Fig. 5.14: Diagramă MATLAB-Simulink pentru controlul în timp real al deplasărilor pe axele X și Y

Diagrama utilizează blocuri specifice din Simulink, precum și blocuri din Arduino, Simulink Support Package for Arduino Hardware. Perioada de eșantionare utilizată pentru sistemul de control în timp real a fost $T = 0.001$ s

Pentru a testa experimental precizia de conturare a sistemului CNC propus, s-a prelucrat un canal circular cu diametrul exterior de 31 de mm și diametrul interior de 29 de mm, O imagine a unui canal circular prelucrat este prezentată în figura 5.15.

Pentru prelucrare s-a utilizat o freză cilindro-frontală de gravat, cu diametrul de 1 mm. Centrul frezei a descris un cerc cu diametrul de 30 de mm, exact ca în cazul simulării regimului de conturare. S-au utilizat două seturi de parametri ai reguletoarelor, iar măsurarea diametrelor interior și exterior ale canalului s-a realizat cu dispozitivul optic de măsurare GOM Atos Core 200, iar pentru prelucrarea și vizualizarea datelor a fost utilizat pachetul software GOM Inspect Suite 2020.

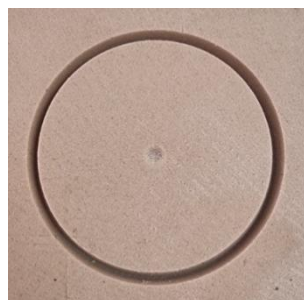


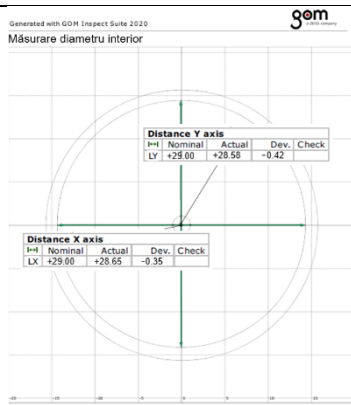
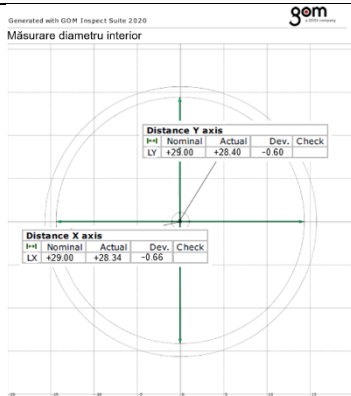
Fig. 5.15: Canalul circular prelucrat

În tabelele 5.2 și 5.3 sunt prezentate rezultatele măsurării diametrelor interior și exterior pentru cele două seturi de parametri ai reguletoarelor pe axele X și Y.

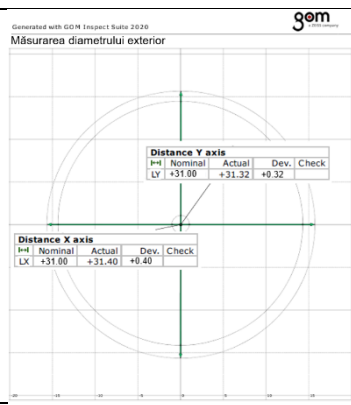
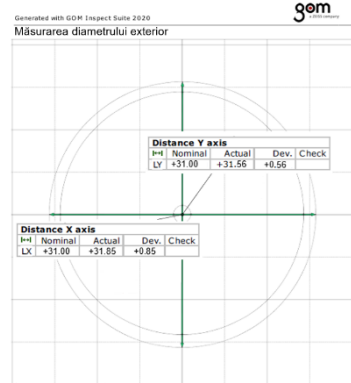
Primul set de parametri de reglaj este cel stabilit în urma studiului prin simulare, iar în cazul celui de-al doilea set s-a utilizat o valoare nulă a constantei derivate.

Se observă că sistemul are o precizie dimensională specifică echipamentelor din această categorie, care, desigur, mai poate fi îmbunătățită, în special prin intervenții asupra structurii mecanice, în sensul creșterii rigidității acesteia.

Tabelul 5.2: Măsurarea diametrului interior

Setul de parametrii de reglaj (axe X și Y)	Măsurarea diametrului interior																														
Axa X: KPx=140, KI_x=0, KD_x=0.05 Axa Y: KPy=140, KI_y=0, KD_y=0.05 <i>(parametrii stabiliți la studiul prin simulare)</i>	 Generated with GOM Inspect Suite 2020 Măsurare diametru interior <table><tr><th colspan="5">Distance Y axis</th></tr><tr><th>I=1</th><th>Nominal</th><th>Actual</th><th>Dev.</th><th>Check</th></tr><tr><td>LY</td><td>+29.00</td><td>+28.58</td><td>-0.42</td><td></td></tr></table> <table><tr><th colspan="5">Distance X axis</th></tr><tr><th>I=1</th><th>Nominal</th><th>Actual</th><th>Dev.</th><th>Check</th></tr><tr><td>LX</td><td>+29.00</td><td>+28.65</td><td>-0.35</td><td></td></tr></table>	Distance Y axis					I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check	LY	+29.00	+28.58	-0.42		Distance X axis					I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check	LX	+29.00	+28.65	-0.35	
Distance Y axis																															
I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check																											
LY	+29.00	+28.58	-0.42																												
Distance X axis																															
I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check																											
LX	+29.00	+28.65	-0.35																												
Axa X: KPx=140, KI_x=0, KD_x=0 Axa Y: KPy=140, KI_y=0, KD_y=0	 Generated with GOM Inspect Suite 2020 Măsurare diametru interior <table><tr><th colspan="5">Distance Y axis</th></tr><tr><th>I=1</th><th>Nominal</th><th>Actual</th><th>Dev.</th><th>Check</th></tr><tr><td>LY</td><td>+29.00</td><td>+28.40</td><td>-0.60</td><td></td></tr></table> <table><tr><th colspan="5">Distance X axis</th></tr><tr><th>I=1</th><th>Nominal</th><th>Actual</th><th>Dev.</th><th>Check</th></tr><tr><td>LX</td><td>+29.00</td><td>+28.34</td><td>-0.66</td><td></td></tr></table>	Distance Y axis					I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check	LY	+29.00	+28.40	-0.60		Distance X axis					I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check	LX	+29.00	+28.34	-0.66	
Distance Y axis																															
I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check																											
LY	+29.00	+28.40	-0.60																												
Distance X axis																															
I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check																											
LX	+29.00	+28.34	-0.66																												

Tabelul 5.3: Măsurarea diametrului exterior

Setul de parametrii de reglaj (axe X și Y)	Măsurarea diametrului interior																														
Axa X: KP_X=140, KI_X=0, KD_X=0.05 Axa Y: KP_Y=140, KI_Y=0, KD_Y=0.05 <i>(parametrii stabiliți la studiul prin simulare)</i>	 Generated with GOM Inspect Suite 2020 Măsurarea diametrului exterior <table><tr><th colspan="5">Distance Y axis</th></tr><tr><th>I=1</th><th>Nominal</th><th>Actual</th><th>Dev.</th><th>Check</th></tr><tr><td>LY</td><td>+31.00</td><td>+31.32</td><td>+0.32</td><td></td></tr></table> <table><tr><th colspan="5">Distance X axis</th></tr><tr><th>I=1</th><th>Nominal</th><th>Actual</th><th>Dev.</th><th>Check</th></tr><tr><td>LX</td><td>+31.00</td><td>+31.40</td><td>+0.40</td><td></td></tr></table>	Distance Y axis					I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check	LY	+31.00	+31.32	+0.32		Distance X axis					I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check	LX	+31.00	+31.40	+0.40	
Distance Y axis																															
I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check																											
LY	+31.00	+31.32	+0.32																												
Distance X axis																															
I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check																											
LX	+31.00	+31.40	+0.40																												
Axa X: KP_X=140, KI_X=0, KD_X=0 Axa Y: KP_Y=140, KI_Y=0, KD_Y=0	 Generated with GOM Inspect Suite 2020 Măsurarea diametrului exterior <table><tr><th colspan="5">Distance Y axis</th></tr><tr><th>I=1</th><th>Nominal</th><th>Actual</th><th>Dev.</th><th>Check</th></tr><tr><td>LY</td><td>+31.00</td><td>+31.56</td><td>+0.56</td><td></td></tr></table> <table><tr><th colspan="5">Distance X axis</th></tr><tr><th>I=1</th><th>Nominal</th><th>Actual</th><th>Dev.</th><th>Check</th></tr><tr><td>LX</td><td>+31.00</td><td>+31.85</td><td>+0.85</td><td></td></tr></table>	Distance Y axis					I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check	LY	+31.00	+31.56	+0.56		Distance X axis					I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check	LX	+31.00	+31.85	+0.85	
Distance Y axis																															
I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check																											
LY	+31.00	+31.56	+0.56																												
Distance X axis																															
I=1	Nominal	Actual	Dev.	Check																											
LX	+31.00	+31.85	+0.85																												

Astfel, după cum se poate observa din tabelele 5.2 și 5.3, utilizarea parametrilor de reglaj stabiliți la simulare conduce la o precizie de prelucrare mai bună decât în cazul unui set diferit de parametri (cu constantă derivativă nulă). Acest lucru certifică două aspecte:

- Setul de parametri de reglaj stabiliți la simulare este validat de testele experimentale;
- Sistemul software de control în timp real nu este influențat de reducerea efortului de calcul datorată utilizării unei constante derivate nule.

5.10 Concluzii

În cadrul acestui capitol a fost propus și realizat un echipament experimental CNC cu arhitectură deschisă. Pentru acest sistem a fost dezvoltat și un mediu integrat de simulare CAE/CAM de tip geamă digital (digital twin).

Partea de simulare CAE a fost implementată în MATLAB-Simulink-Simscape, unde au fost realizate diagrame de simulare care permit studiul comportării sistemelor de control al mișcării din structura echipamentului CNC. Partea de simulare CAM a fost implementată în pachetul software ENCY, în care a fost dezvoltat un model cinematic al sistemului, care permite studiul mișcării elementelor mobile ale echipamentului CNC în timpul prelucrării prin frezare a pieselor, conform celor prezentate de asemenea în tabelul 5.3.

Au fost realizate de asemenea încercări experimentale care au validat acuratețea studiilor prin simulare, din punct de vedere al acordării reguletoarelor numerice.

Capitolul 6

Concluzii generale, contribuții originale și direcții de cercetare viitoare

Structura logică care a stat la baza elaborării prezentei teze de doctorat este prezentată în organigrama din figura 6.1.

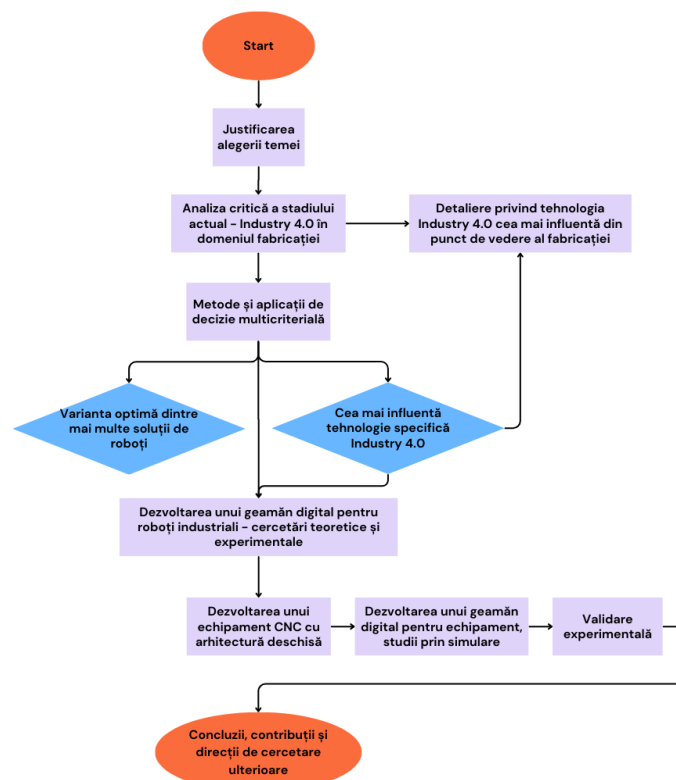


Fig. 6.1: Structura schematică a tezei de doctorat

6.2 Contribuții

Pe parcursul elaborării prezentei teze de doctorat autorul a adus o serie de contribuții originale, care pot fi împărțite în contribuții teoretice și contribuții experimentale.

Din punct de vedere al contribuțiilor teoretice se pot evidenția următoarele:

- Realizarea unei analize critice a stadiului actual al cercetărilor legate de conceptul Industry 4.0 în contextul sistemelor de fabricație;
- Propunerea și aplicarea unei metode de analiză multicriterială bazată pe tehnica AHP, care a permis identificarea tehnologiei de modelare și simulare prin utilizarea gemenilor digitali ca fiind cea mai influentă tehnologie Industry 4.0 din punctul de vedere al proceselor de fabricație;
- Propunerea și aplicarea unei metode de analiză multicriterială bazată pe tehnicile BMW și TOPSIS care permite selecția celei mai bune variante de robot industrial dintr-o serie de alternative;
- Realizarea unui model CAE care permite studiul prin simulare al cinematicii și dinamicii robotului industrial KUKA KR 6-2;
- Realizarea unui model CAM care permite generarea traiectoriilor necesare pentru prelucrare pieselor împreună cu codul numeric (programul) pentru parcurgerea acestora, vizualizarea procesului de prelucrare, incluzând mișcările robotului și procesul de îndepărtare a materialului sub formă de așchii, și identificarea și eliminarea coliziunilor;
- Integrarea celor două modele CAE și CAM amintite mai sus într-un model integrat de simulare CAE/CAM de tip geamăn digital pentru robotul industrial KUKA KR 6-2;
- Realizarea unui studiu prin simulare care a permis stabilirea unei legături între poziționarea semifabricatului în spațiul de lucru al robotului și variațiile momentelor rezistente tehnologice în articulațiile acestuia;
- Realizarea unei diagrame de simulare hibridă, bazată pe interpretarea fenomenologică a sistemelor de control al mișcării din structura echipamentului CNC cu arhitectură deschisă și dezvoltarea acesteia la nivelul unui model de simulare CAE;
- Realizarea unui studiu prin simulare privind acordarea preliminară a reguletoarelor sistemelor de control al mișcării, studiul regimului de poziționare rapidă și studiul regimului de conturare;
- Realizarea unui model de simulare CAM al echipamentului CNC care permite simularea mișcărilor executate de sculă, a celor executate de semifabricat și a celor executate de elementele mobile ale mașinii precum și simularea modului în care sculele îndepărtează materialului semifabricatului prin procedeul de frezare;
- Integrarea celor două modele CAE și CAM amintite mai sus într-un model integrat de simulare CAE/CAM de tip geamăn digital pentru echipamentul CNC cu arhitectură deschisă.

Din punct de vedere al contribuțiilor experimentale se pot evidenția următoarele:

- Realizarea unui stand experimental pentru prelucrări prin așchiere cu roboți industriali, prin echiparea robotului KUKA KR 6-2 cu unitatea de lucru de tip cap de frezare și cu sisteme de susținere și fixare a semifabricatului;
- Realizarea unor prelucrări prin frezare cu robotul industrial KUKA KR 6-2 care au validat ipotezele teoretice privind legătura între poziționarea semifabricatului în spațiul de lucru al robotului și variațiile momentelor rezistente tehnologice în articulațiile acestuia;
- Realizarea structurii mecanice și de acționare a unui echipament CNC cu structură deschisă;
- Integrarea servomotoarelor de curent continuu de acționare ale axelor de mișcare cu traductoarele incrementale fotoelectrice (encodere), cu driverele de comandă ale

motoarelor și cu plăcile de dezvoltare cu microcontrollere, într-un sistem integrat de comandă și control cu arhitectură deschisă;

- Dezvoltarea unui modul software de comandă și control în timp real al echipamentului CNC, bazat pe pachetul software Simulink Support Package for Arduino Hardware;
- Realizarea unor determinări experimentale (prelucrări prin frezare) pe echipamentul CNC dezvoltat, care au validat ipotezele propuse în cadrul studiilor prin simulare.

6.3 Direcții de cercetare viitoare

Direcțiile de cercetare ulterioare vor viza:

- Includerea unor valori mai exacte ale maselor și inerțiilor elementelor componente ale structurii robotului industrial în modelul CAE de simulare a cinematicii și dinamicii acestuia. În prezent aceste informații sunt preluate din modelul geometric 3D al robotului și nu au un grad foarte ridicat de precizie;
- Stabilirea influenței poziției semifabricatului în spațiul de lucru al robotului asupra consumurilor energetice din timpul procesului de prelucrare prin frezare;
- Stabilirea factorilor de influență din procesul de frezare robotică (regimuri de prelucrare, traiectorii optimizate, etc.) care să conducă la reducerea consumurilor energetice;
- Dezvoltarea unor gemeni digitali care să includă și module software de procesare a informațiilor provenite de la senzorii și traductoarele montate pe sistemul fizic;
- Implementarea pe sistemul CNC dezvoltat a unor strategii de reglare mai avansate decât strategiile PID (regulatoare feed-forward, regulatoare fuzzy, etc.);
- Utilizarea unor plăci de comandă cu microcontrollere mai avansate (pe 16 sau 32 de biți) ca sisteme de comandă și control pentru echipamentul CNC dezvoltat.