

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Tehnologică şi Management Industrial

Ing. Andrei – Ionuţ BERARIU

**Controlul activ al vibraţiilor induse de
procesul de aşchiere în structura
maşinilor-unelte în scopul creşterii
preciziei de prelucrare**

**Active control of vibrations induced by
the cutting process in the machine tool
structure to improve machining
accuracy.**

REZUMAT

Conducător ştiinţific

Prof. Dr. Ing. Tudor – Ion DEACONESCU

BRAŞOV, 2023

Cuprins

	pg. teză	pg. rezumat
Rezumat	5	---
Abstract	7	---
Prefață	9	---
CUPRINS	11	2
1 INTRODUCERE	15	6
1.1 Scop și obiective	22	6
2 DINAMICA PROCESULUI DE AȘCHIERE	24	8
2.1 Aspecte teoretice	24	---
2.1.1 Tipuri de vibrație	24	---
2.1.2 Studiul vibrațiilor mecanice	25	---
2.1.2.1 Modele matematice	25	---
2.1.2.1.1 Vibrații forțate neamortizate	29	---
2.1.2.1.2 Vibrații forțate amortizate	30	---
2.1.2.1.3 Vibrațiile în sisteme cu N grade de libertate (MDOF)	34	---
2.1.2.1.4 Modurile normale de vibrație	35	---
2.1.2.1.4.1 Ortogonalitatea modurilor normale	36	---
2.1.2.1.4.2 Moduri naturale în sisteme de coordonate generalizate	36	---
2.1.2.1.5 Vibrațiile forțate neamortizate în sistemele MDOF	37	---
2.1.2.1.6 Vibrațiile forțate amortizate în sistemele MDOF	38	---
2.1.2.1.6.1 Distribuția uniformă a amortizării vâscoase	39	---
2.1.2.1.6.2 Distribuția uniformă a amortizării structurale	40	---
2.1.2.1.6.3 Distribuția uniformă a amortizării masice	40	---
2.1.2.1.7 Ecuația generală pentru vibrațiile forțate	41	---
2.1.2.2 Modele experimentale	41	---
2.1.2.2.1 Măsurarea semnalelor generate de oscilații periodice	44	---
2.1.2.2.2 Măsurarea semnalelor generate de oscilații aleatoare (complexe)	45	---

2.1.3	Reprezentarea semnalelor în domeniul frecvență	46	---
2.2	Stabilitatea dinamică a proceselor de aşchiere	48	8
2.2.1	Estimarea stabilităţii dinamice	50	---
2.2.1.1	Tehnici analitice de estimare a stabilităţii dinamice	50	---
2.2.1.1.1	Diagrama lobilor de stabilitate	51	---
2.2.1.1.1.1	Coeficienţii forţelor de aşchiere	52	---
2.2.1.1.1.2	Parametrii sistemului dinamic	56	---
2.2.1.1.1.3	Parametrii procesului de aşchiere	61	---
2.2.1.1.1.4	Geometria sculei aşchietoare	67	---
2.2.1.1.2	Diagramele Nyquist	68	---
2.2.1.1.3	Analizele cu elemente finite (FEM/MEF)	72	---
2.2.1.1.3.1	Procesul de discretizare	75	---
2.2.1.1.3.2	Modele de simulare a materialului	75	---
2.2.1.1.3.3	Modele de simulare a frecărilor	76	---
2.2.1.1.3.4	Separarea aşchiei	77	---
2.3	Echipamente utilizate pentru măsurarea, achiziţia şi procesarea semnalelor dinamice generate de maşinile-unelte	80	---
2.3.1	Senzori pentru măsurarea fenomenelor dinamice	81	---
2.3.1.1	Senzori cu contact	81	---
2.3.1.2	Senzori fără contact	84	---
2.3.1.3	Aspecte practice în alegerea accelerometrelor	88	---
2.3.1.4	Accelerometre comerciale utilizate în industrie	89	---
2.3.2	Sisteme de achiziţie, convertoare analog – digital	92	---
2.3.2.1	Rezoluţia/Precizia ADC	93	---
2.3.2.2	Rata de eşantionare	93	---
2.3.2.3	Sisteme de achiziţie comerciale utilizate la măsurarea fenomenelor dinamice	94	---
2.4	Produce software utilizate pentru procesarea semnalelor măsurate ...	95	---
2.5	Concluzii	97	9

3 STUDII TEORETICE ŞI EXPERIMENTALE PRIVIND CONTROLUL ACTIV AL VIBRAȚIILOR LA MAȘINILE-UNELTE	100	11
3.1 Detectarea autovibrațiilor	110	---
3.2 Tehnici pasive de control a autovibrațiilor	112	---
3.3 Tehnici active de control a autovibrațiilor	113	---
3.4 Concluzii	117	12
4 STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND CONTROLUL ACTIV AL VIBRAȚIILOR LA MAȘINILE-UNELTE FOLOSIND INTELIGENȚA ARTIFICIALĂ	119	14
4.1 Inteligența artificială (AI)	119	---
4.2 Monitorizarea/Controlul proceselor de aşchiere folosind AI	121	14
4.3 Generarea sintetică a eşantioanelor de antrenare	124	15
4.3.1 Simularea procesului de aşchiere, calculul forțelor de aşchiere	125	16
4.3.2 Generarea de eşantioane dinamice de aşchiere folosind explorarea parametrică ghidată	131	17
4.4 Determinarea funcțiilor de transfer la mașinile-unelte	139	19
4.4.1 Evaluarea modală a cuțitului de strung SVJBL 2020K 16	140	---
4.4.2 Evaluarea modală a sistemului generator la strunjirea longitudinală cu cuțitul de strung SVJBL 2020K 16	147	19
4.4.3 Proiectarea/Prototiparea sistemului de măsurare a funcțiilor de transfer la strunjirea longitudinală pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42	155	22
4.4.3.1 Optimizarea dispozitivelor de măsurare a inertanțelor cu pretensionare la strunjirea longitudinală folosind soluții de explorare parametrică	164	---
4.4.3.2 Instrumentarea și calibrarea sistemului de măsurare a preîncărcării	170	24
4.4.3.3 Realizarea măsurătorilor experimentale	176	26
4.5 Cuplarea eşantioanelor sintetice de aşchiere cu funcțiile de transfer MU	190	---
4.5.1 Utilizarea funcțiilor de transfer simulate cu metoda elementelor finite	190	---
4.5.2 Utilizarea funcțiilor de transfer măsurate experimental	193	---
4.6 Antrenarea și testarea rețelelor neuronale cu eşantioane sintetice	195	31



4.7	Concluzii	204	34
5	CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	209	37
5.1	Concluzii generale	209	37
5.2	Contribuții personale	211	38
5.3	Direcții viitoare de cercetare	213	40
5.4	Valorificarea tezei	214	41
	BIBLIOGRAFIE (extras)	216	42
	ANEXE	226	---
	Anexa 1 – Generarea secțiunii așchii detașate la operația de frezare (program Python)	226	---
	Anexa 2 – Post-procesarea rezultatelor simularilor de așchiere în bucla DSE (program Python)	236	---
	Anexa 3 – Firmware pentru dispozitivele de măsurare a forțelor de pretensionare – dispozitive utilizate la măsurarea inertanțelor pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42	241	---
	Anexa 4 – Cod sursă pentru generare, antrenare și testare rețele neuronale utilizând platforma Keras (Python)	242	---
	Anexa 5 – Tabel de centralizare a tuturor configurațiilor testate la rețelele neuronale. Construcție, hiperparametri, activări și preciziile raportate	246	---
	DECLARAȚIE DE AUTENTICITATE	249	---

1 INTRODUCERE

Operațiile de aşchiere reprezintă la ora actuală principalele procese de generare a suprafețelor folosite în industrie, acestea cunoscând de-a lungul anilor o evoluție și o diversificare continuă. În majoritatea cazurilor, procesele tehnologice de aşchiere sunt acompaniate de fenomene dinamice cu efect predominant negativ în ceea ce privește calitatea suprafețelor obținute și durabilitatea sculelor aşchietoare. Monitorizarea acestor fenomene se poate face folosind tehnici complexe de estimare și măsurare a diverselor mărimi fizice asociate procesului de formare a aşchii și a stării de rigiditate dinamică a mașinii-unelte (MU).

O ramură a cercetării internaționale intens studiată în ultima vreme este inteligența artificială (AI). Din cauza numărului mare de variabile ce pot influența apariția fenomenelor de autovibrație, elaborarea relațiilor/modelelor matematice analitice capabile să genereze informații utile legate de apariția și controlul acestui fenomen este dificilă, chiar imposibilă. O posibilă alternativă în acest sens o reprezintă utilizarea tehnologiilor AI. Un impediment major în ceea ce privește implementarea tehnologiilor AI îl reprezintă antrenarea rețelelor neuronale. În general, această etapă de implementare necesită un număr mare de eșantioane, disponibilitatea și/sau costul lor fiind una dintre principalele bariere.

Prezenta lucrare propune o întreagă platformă de dezvoltare a acestor tehnologii pentru controlul fenomenelor dinamice la aşchiere prin utilizarea celor mai noi metode de simulare cu elemente finite (CAE/MEF) și explorări parametrice (DSE). Setul de eșantioane obținut a fost folosit în ultima parte a lucrării, unde au fost testate mai multe variante de rețele neuronale. Testarea a avut ca obiectiv identificarea și expunerea principalilor parametri constructivi și de antrenare ce intervin direct asupra performanțelor computaționale și de predicție, centrată pe diferența de complexitate a celor două seturi de date de antrenare (F_x și F_y).

1.1 Scop și obiective

Această teză de doctorat s-a concentrat în mare parte pe dezvoltarea unei infrastructuri complexe de implementare a tehnologiilor cu inteligență artificială (AI) la mașini-unelte (MU), capabilă să detecteze și să controleze apariția fenomenului de autovibrație. Scopul principal a constat în elaborarea, prototiparea și validarea componentelor necesare antrenării rețelelor neuronale folosind elemente derivate din conceptul Digital Twin (termen din limba engleză ce reprezintă capacitatea unui model digital de a reprezenta comportamente complexe fidele modelului real).

Pornind de la stadiul actual al aparatului matematic și a tehnicii folosite în analiza proceselor dinamice, prezentate în prima parte a tezei, sunt analizate critic modalitățile de detecție și control a fenomenului de autovibrație la operațiile de aşchiere. Pe baza concluziilor obținute a fost posibilă conturarea problemei din punct de vedere constructiv, fizic și matematic prin

expunerea relațiilor și limitărilor interdimensionale pe baza cărora fenomenul fizic vizat poate fi abordat. Utilizarea tehnologiilor AI implică executarea unei prime etape de antrenare, etapă ce necesită în general un număr mare de eșantioane. Principalele obiective urmărite de prezenta lucrare gravitează în jurul acestei etape critice prin propunerea unor abordări sinergice de generare a acestor eșantioane sintetice folosind tehnică de calcul. Generarea lor presupune decuplarea sistemului dinamic în două componente critice: prima componentă se concentrează pe obținerea forțelor induse de procesul de formare a așchiei, iar cealaltă este componenta modală a sistemului integral cu care sursa perturbatoare se va cupla. Pentru obținerea primei componente au fost explorate diferite metode de estimare, soluția finală adoptată fiind utilizarea simulărilor numerice cu elemente finite. Un obiectiv secundar rezultat din adoptarea acestei soluții este cel de optimizarea a performanțelor de calcul prin reducerea dimensională a machetei numerice utilizate, controlând în același timp nivelul de corelare. Scalabilitatea metodei de simulare este asigurată prin intermediul unei soluții de conversie, soluție ce permite aplicarea metodologiei de generare sintetică a eșantioanelor dinamice pe procedee simple precum strunjirea și pe procedee cu grad mai ridicat de complexitate precum operația de frezare. Pentru a facilita expunerea eficientă a interdependențelor parametrilor implicați în procesul de formare a așchiei, numărul combinațiilor posibile fiind foarte ridicat, a fost propusă utilizarea de metode moderne de explorare parametrică. Aceste metode au capacitatea de a expune printr-un număr redus de configurații principalii parametri de influență și domeniile critice de variație ce induc apariția vibrațiilor armonice la formarea așchiei. Caracteristica modală a sistemului generator poate fi determinată, în general, experimental sau folosind diverse metode numerice de estimare. Metoda de simulare cu elemente finite oferă cea mai mare flexibilitate în ceea ce privește explorarea configurațiilor proceselor generatoare însă această metodă nu poate fi aplicată mereu la toate mașinile-unelte, în special la cele vechi. Disponibilitatea informațiilor geometrice și fizice reprezintă principalul impediment în ceea ce privește utilizarea acestor metode. În consecință, prezenta lucrare s-a concentrat pe elaborarea unui sistem experimental capabil să măsoare funcțiile de transfer (inertanțele) ale punctului generator. Obiectivele urmărite în această etapă vizează elaborarea dispozitivelor de pretensionare ale sistemului generator fără a interveni asupra comportamentului modal. Și în acest caz au fost folosite tehnici avansate de optimizare și explorare parametrică care au permis realizarea dispozitivelor finale de măsurare folosite la cartografierea valorilor de rigiditate dinamică pe un strung CNC fizic, valori cuplate ulterior cu spectrele de încărcare. În finalul prezentei teze de doctorat au fost explorate, evaluate și propuse diferite configurații de rețele neuronale în vederea estimării stărilor de stabilitate dinamică la procesele de așchiere. În esență, principalul obiectiv a fost acela de a expune complexitatea procesului de antrenare și modul în care atât numărul de eșantioane cât și hiperparametrii utilizați pot influența performanțele finale. Un aspect critic rezultat din această ultimă etapă de validare este cel legat de costul de antrenare, o viteză de reacție acceptabilă a unui sistem de acest fel legat în buclă de reacție fiind puternic influențat de acest aspect.

2 DINAMICA PROCESULUI DE AŞCHIERE

2.2 Stabilitatea dinamică a proceselor de aşchiere

În funcție de valoarea rigidității dinamice a componentelor sistemului mecanic de aşchiere (scula aşchietoare, sistemul port sculă, sistemul de prindere a semifabricatului, semifabricat etc) se pot deosebi trei tipuri de vibrații [27]:

- a) vibrații libere;
- b) vibrații forțate;
- c) autovibrații.

În cazul vibrațiilor libere și a celor forțate este suficientă determinarea surselor pentru a corecta sau diminua efectele negative ale acestora. Intervențiile directe asupra regimului de aşchiere sau în structura MU au efecte scalabile și imediate, cu șanse mici de nereușită (calcul analitic / cinematic, eliminarea componentelor neconforme din sistemul de aşchiere).

Autovibrațiile sunt cauzate de variația periodică a forțelor produse de interacțiunea dintre scula aşchietoare și semifabricat. Acest tip de vibrație mărește instabilitatea sistemului și duce la o creștere a efortului de control a regimului de funcționare. În funcție de dinamica sistemului generator se pot distinge trei componente ale autovibrațiilor [27]:

1. autovibrații cauzate de frecări;
2. autovibrații modale;
3. autovibrații regenerative.

Literatura de specialitate expune autovibrațiile cauzate de frecări și pe cele regenerative ca fiind preponderente în apariția vibrațiilor nedorite (chatter) în procesele de aşchiere [28]. Această ipoteză este relativ recentă și necesită încă multă cercetare pentru a putea fi acceptată. Alte lucrări propun ca principali contribuitori autovibrațiile modale și regenerative [29]. Autovibrațiile cauzate de frecări (Fig. 2.22) sunt atribuite contactului nonliniar dintre scula aşchietoare - semifabricat (contact ce are aceeași direcție cu viteza de aşchiere) și forțele de aşchiere dependente de viteză. În ceea ce privește contactul sculă aşchietoare – semifabricat, trebuie menționat și cazul particular numit "stick-slip" care amplifică exponențial perturbațiile din sistem și pentru care se poate face o analogie cu fenomenul de rezonanță [27] [28].

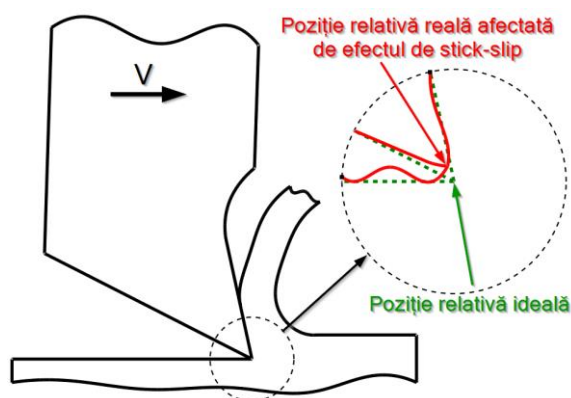


Fig. 2.22 Efectul frecărilor la strunjire (stick-slip)

Autovibrațiile modale sau cuplarea modală reprezintă fenomenul prin care două sau mai multe moduri naturale de vibrație, apropiate ca frecvență dar pe direcții diferite, intră într-un proces de cumulare [27] [28].

Autovibrațiile regenerative (Fig. 2.24) sunt cauzate de procesul de formare a aşchii și de cinematica de generare. În procesul generator, scula aşchietoare (sau mai precis partea activă) dislocă secțiuni de material ce au minim o față generată de trecerea precedentă. Această față imprimă comportamentul dinamic instantaneu al sistemului mecanic ducând la variația grosimii secțiunii ce urmează a fi dislocate. Cinematica funcțională este principalul factor de influență în acest caz. Complexitatea spațială de generare a aşchii este direct proporțională cu numărul de dimensiuni în care acest fenomen trebuie modelat (comparând strunjirea și frezarea, frezarea este de cele mai multe ori mai greu de modelat/controlat în ceea ce privește autovibrațiile regenerative) [27] [29].

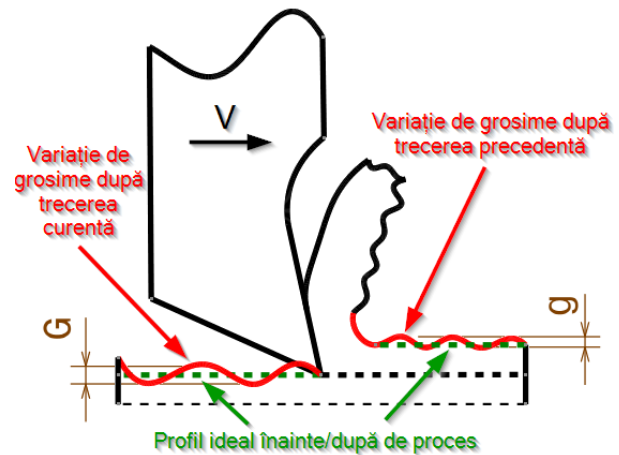


Fig. 2.24 Autovibrații regenerative cauzate de variația secțiunii de aşchiere (g – înainte de aşchiere; G – după procesul de aşchiere)

În continuarea acestei lucrări se vor studia procesele de strunjire și cele de frezare, ele fiind cele mai reprezentative metode de generare a suprafețelor prin aşchiere. Se observă faptul că în ultimii ani numărul cercetărilor concentrate pe controlul fenomenului de autovibrație la MU a scăzut vertiginos (Fig. 2.25), semnalând atingerea unei limite teoretice și/sau tehnice. Istoria spune că aceste perioade de stagnare sunt cauzate de ritmurile diferite pe care domeniile implicate le au în dezvoltare [27].

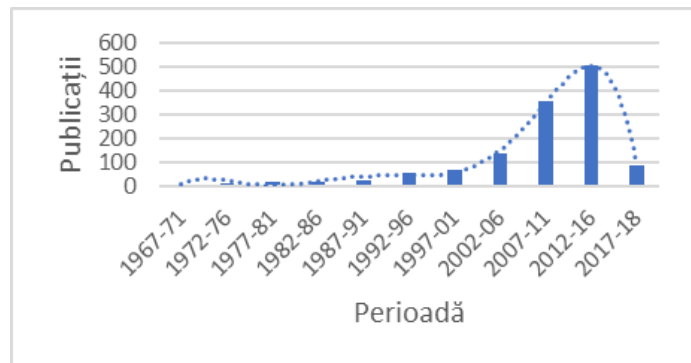


Fig. 2.25 Evoluția cercetării fenomenului de autovibrație la operația de frezare [27]

2.5 Concluzii

Uzual, estimarea stabilității dinamice reprezintă primul pas prin care se pot extrage informații utile legate de comportamentul întregului sistem generator. Majoritatea metodelor clasice utilizate în acest scop presupun separarea celor două componente active principale în modele pentru formarea aşchii și modele de estimare a rigidității MU. Tehnicile analitice precum diagramele cu lobi de stabilitate sau diagramele Nyquist au reprezentat și reprezintă în

continuare principalele unelte de analiză chiar și în contextul digitalizării agresive prin care toate industriile trec sau au trecut (Industry 4.0).

În prezenta lucrare au fost expuse câteva metode uzuale prin care această determinare analitică se poate aplica pentru operațiile de strunjire și frezare. Principalele componente ce intervin în estimarea analitică a stabilității dinamice la MU sunt: coeficienții forțelor de așchiere, parametrii sistemului dinamic, cei ai procesului de așchiere și geometria sculei așchietoare. O alternativă la metodele analitice de estimare a stabilității dinamice în procesele de așchiere o reprezintă utilizarea metodelor numerice (analiza cu elemente finite). Modulele principale necesare modelării corecte a procesului de deformare sunt: discretizarea, modelarea materialului, modelarea frecărilor și modelarea fenomenului de separare a așchiei. Toate aceste module sunt îmbunătățite constant de companiile private și de cercetători, tendințele actuale sugerând o încercare de unificare și automatizare a lor.

Procesele de așchiere au în componența lor o suită de fenomene dinamice, fiecare având capacitatea de a influența mai mult sau mai puțin precizia prelucrărilor. Vibrațiile fac parte din categoria celor mai importante fenomene care trebuie studiate și controlate (sau evitate), deoarece acestea au capacitatea de a influența atât calitatea suprafeței obținute cât și durabilitatea sistemului așchietor și, la extrem, pot duce la distrugerea întregului sistem de generare.

În prezent există câteva metode consacrate de măsurare a vibrațiilor, cum ar fi cea prin contact cu senzori piezoelectrice. Această metodă oferă, pe lângă avantajele unei dezvoltări ce a început acum mai bine de jumătate de secol, și dezavantajul dat de faptul că dezvoltarea ei a atins maximumul posibil dat de limitările fizice. Din acest motiv cercetarea curentă este concentrată mai mult pe partea de pre-procesare a semnalului și/sau condiționare/filtrare, încercându-se optimizarea la maximum a informației obținute de la senzori prin intermediul sistemelor de calcul.

Dacă în trecut cea mai costisitoare operație din lanțul de măsurare era stocarea și procesarea semnalelor obținute de la senzori, în prezent acest lucru a devenit foarte accesibil permițând dezvoltarea unor noi mijloace digitale (sisteme de achiziție și programe de calculator) capabile să filtreze, să proceseze și să extragă o gamă largă de informații cu o precizie relativ mare dată de algoritmi matematici complecși imposibil (sau inacesibili) de executat în trecut.

În paralel cu dezvoltarea senzorilor a mers și modelarea matematică a fenomenului vibrator, acest aspect fiind puternic corelat cu dezvoltarea puterii de calcul. Dezvoltarea unui sistem performant de măsurare și/sau control al vibrațiilor la MU presupune cercetarea ambelor ramuri. Metode noi prin care se încearcă valorificarea unor modele matematice originale sunt dezvoltate continuu și prezintă rezultate promițătoare, sugerând o posibilă revenire a subiectului în viitoarele cercetări.

3 STUDII TEORETICE ŞI EXPERIMENTALE PRIVIND CONTROLUL ACTIV AL VIBRAŢIILOR LA MAŞINILE-UNELTE

Dezvoltarea continuă a senzorilor și a tehnologiilor de procesare permite elaborarea unor metode și sisteme de măsurare a forțelor de aşchiere, acompaniate des și de semnalul sonor specific, ce permit detectarea zonelor stabile sau instabile [88]. Tabelul 3.1 ilustrează câteva sisteme de detecție utilizate recent, organizate în funcție de operația analizată, mărimea fizică măsurată, tipul sensorului, tehnica de procesare a semnalului și criteriul de detecție folosit.

Tabelul 3.1 Sisteme de detectare a autovibrațiilor [89]

Operație	Cantitate fizică	Senzor	Tipul de procesare de semnal	Criteriul de detectare al autovibrațiilor
Frezare	Emisii acustice	Microfon	Densitate spectrală de putere	Nivelul energetic
Strunjire	Vibrație sculă	Accelerometru	Spectrul de coerență	Funcția de coerență apropiată de valoarea 1 la anumite frecvențe.
Frezare	Vibrație arbore + Forțe de aşchiere	Senzori Eddy + Dinamometru	Traiectoria sculei aşchietoare + densitatea spectrală de putere	Analiză calitativă
Frezare	Vibrație sculă	Laser	Traiectoria sculei	Analiză calitativă
Strunjire	Forțe de aşchiere	Dinamometru	Nivelul entropiei de granulație	Analiză calitativă
Frezare	Emisii acustice	Microfon	Eșantionarea semnalului per rotație	Nivel maxim admis
Frezare	Forțe de aşchiere	Dinamometru	Funcție de undă	Coeficienții funcției de undă admiși
Frezare	Vibrație piesă	Senzori Eddy	Eșantionarea semnalului per rotație, segmentare poincare, densitate spectrală de putere, Traiectoria sculei	Nivel maxim admis, segmentare poincare haotică, distribuție de puteri anormale, entropie mică
Rectificare	Forțe de aşchiere normală + Emisii acustice	Senzori Eddy + Microfon	Nivelul entropiei de granulație	Nivel maxim admis, segmentare poincare haotică
Frezare	Forțe de aşchiere + Emisii acustice	Dinamometru + Microfon	Densitate spectrală de putere	Nivelul energetic
Frezare	Forțe de aşchiere	Dinamometru	Transformata Fourier	Distribuție spectrală anormală
Frezare	Vibrație sculă	Laser	Eșantionarea semnalului per rotație, segmentare poincare, densitate spectrală de putere, Traiectoria sculei	Nivel maxim admis, segmentare poincare haotică, distribuție de puteri anormale, entropie mică
Frezare	Emisii acustice	Microfon	Densitate spectrală de putere	Nivelul energetic

Atât banda de frecvență utilizată cât și poziționarea sensorului joacă un rol crucial în indentificarea corectă a acestui fenomen. O bandă de frecvențe suficientă pentru acest tip de măsurare este cuprinsă între 100 și 5000 [Hz].

O regulă generală în ceea ce privește poziționarea sensorului este să fie cât mai aproape de sursă, însă acest lucru nu este tot timpul posibil [89]. Conform cercetărilor recente, la operația de frezare cei mai recomandați senzori sunt cei de deplasare, accelerometrele, dinamometrele și microfoanele (Fig. 3.16). Există și cazuri în care alți senzori sunt mai eficienți, cum ar fi senzorii de curenți Eddy sau laser, însă poziționarea lor este dificilă în special pentru mașinile-unelte ce prezintă o cinematică de generare complexă. Totodată, dinamometrele prezintă și ele limitări importante precum banda maximă de lucru care este undeva în jurul valorii de 1 [kHz]. Microfoanele prezintă foarte multe avantaje, precum precizia ridicată și costul redus, însă necesită un mediu controlat de funcționare din cauza numeroaselor surse perturbatoare de zgomot ce pot apărea în jurul mașinii-unelte.

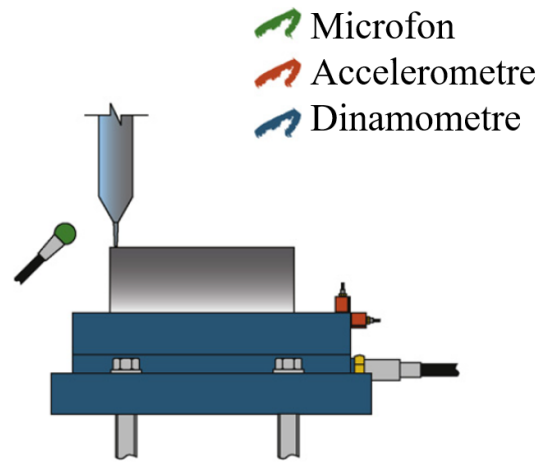


Fig. 3.16 Dispunerea uzuală a senzorilor [90]

3.4 Concluzii

Un prim pas care trebuie făcut în vederea controlării fenomenelor de autovibrație este detecția lor. Distincția dintre metodele de detecție se face în funcție de operația monitorizată, mărimea fizică măsurată, sensorul utilizat, tipul de procesare a semnalului și criteriul de detecție. Metoda recomandată pentru monitorizarea operației de strunjire presupune utilizarea accelerometrelor (măsurarea vibrațiilor/accelerațiilor) și analiza spectrală a semnalului. Pentru operația de frezare, metodele propuse implică utilizarea emisiilor acustice și/sau a forțelor de așchiere prin intermediul microfoanelor, respectiv a dinamometrelor. În încercarea de unificare a soluției propuse, în această teză de doctorat se va adopta metoda comună de monitorizare utilizată la operația de strunjire și la operația de frezare.

Primele dispozitive de control al vibrațiilor (nu neapărat al autovibrațiilor) au fost cele pasive. Controlul pasiv este în general aplicat la mașinile-unelte prin intermediul filtrelor însă, în sens general, acest control se poate obține și prin intermediul unui proces de optimizare a proiectării mașinii-unelte. Gama de dispozitive (absorbante) folosite pentru controlul proceselor de așchiere este destul de restrânsă. Trebuie totuși menționat faptul că fiecare tip de absorbant este capabil să preia un anumit tip de excitație și acționează pe frecvențe predeterminate cu posibilitate limitată de reglaj.



Sistemele active de control al vibraţiilor la maşinile-unelte sunt tratate cu mare interes de către comunitatea ştiinţifică şi de industrie datorită multiplelor avantaje pe care le pot aduce. Primul, este capacitatea de reglaj continuu a amortizării prin intermediul controlului direct al parametrilor de aşchiere sau, indirect, prin manipularea sistemelor fizice de atenuare. Dacă pentru abordările pasive modelul dinamic trebuie cunoscut în prealabil, în cazul metodelor active acesta se poate determina experimental prin intermediul sistemelor cu buclă deschisă sau închisă. Este permisă astfel o unificare a modelelor de control care va duce în final la o flexibilitate în ceea ce priveşte aplicabilitatea lor.

4 STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND CONTROLUL ACTIV AL VIBRAȚIILOR LA MAȘINILE-UNELTE FOLOSIND INTELIGENȚA ARTIFICIALĂ

4.2 Monitorizarea/Controlul proceselor de aşchiere folosind AI

Mișcarea de digitalizare accelerată (Industry 4.0) concentrată în principal pe creșterea productivității, reducerea costurilor de producție și a rebuturilor a dus la apariția centrelor de prelucrare automate. Acestea au în componența lor o multitudine de funcții automate precum detecția de coliziuni, monitorizarea procesului de fabricație și anumite tipuri de optimizări. Majoritatea tehnologiilor de optimizare online (chiar și offline) a procesului de aşchiere necesită un nivel minim de măsurare a semnalelor dinamice. Ca o consecință, identificarea și detectarea fenomenelor de autovibrație sunt subiecte des abordate de comunitatea științifică. Pe baza celor discutate în Cap. 3.1, se poate concluziona faptul că pentru detectarea fenomenului de autovibrație la procesele de aşchiere sunt folosite măsurători de forțe de aşchiere, de accelerații, de emisii acustice sau alte semnale electrice purtătoare de informație caracteristică. Aceste semnale măsurate sunt evaluate în practică folosind diverși algoritmi de procesare cum ar fi (termeni în limba engleză): Short-Term Fourier Transform (STFT), Wavelet Transform (WT), Wavelet Packet Decomposition (WPD), Hilbert-Huang Transform (HHT), empirical mode decomposition (EMD), Variational Mode Decomposition (VMD) sau Local Mean Decomposition (LMD). La nivel fundamental, aceste sisteme de detecție a fenomenului de autovibrație trebuie să execute trei pași de bază: colectarea semnalelor dinamice, extragerea caracteristicilor dinamice din semnal și evaluarea stării dinamice a sistemului. Practic, informațiile generate de ultimul pas pot deveni date de intrare pentru orice sistem de control pasiv (Cap. 3.2) sau activ (Cap. 3.3), colecția de date (intrare + ieșire) putând fi folosită mai departe pentru dezvoltarea unui model geamă digital (Digital Twin) foarte util altor aplicații mai avansate.

Utilizarea inteligenței artificiale în detecția/controlul fenomenelor de autovibrație la aşchiere introduce un nou pas fundamental, antrenarea și testarea rețelelor neuronale (vezi Cap.4.1). Pasul de colectare a datelor urmărește definirea a cât mai multor seturi de măsurători corelate cu starea sistemului. Utilizarea unui set reprezentativ și suficient de mare de eșantioane în antrenarea rețelelor este esențială pentru generalizarea performanței obținute în final. Uzual, pentru acest tip de aplicație, sunt folosite următoarele tipuri de rețele neuronale: mașini vectoriale de asistență (SVM), rețele neuronale artificiale (ANN), perceptronul multistrat (MLP), modele nesupervizate și modele specifice DL cum ar fi rețelele convoluționale (CNN).

În Tabelul 4.2 sunt raportate performanțele obținute de cele mai recente cercetări științifice în domeniul detecției și/sau controlului fenomenului de autovibrație la operațiile de aşchiere.

Tabelul 4.2 Performanța raportată în cele mai recente studii științifice legate de detecția fenomenului de autovibrație la aşchiere [96]

Algoritm de procesare semnal	Modelul utilizat	Operația de aşchiere	Precizia raportată [%]
WT	MLP	Frezare	94
WT	SVM	Strunjire	95
EMD	SVM	Strunjire	95
VMD	SVM	Frezare	92.59
WT	CNN	Frezare	99
STFT	CNN	Frezare	98.9
EMD	AlexNet	Frezare	82 – 100

După cum se poate observa, comunitatea științifică testează multe configurații/tehnici adesea combinate cu alte metode mai mult sau mai puțin empirice, care au dus la rezultate promițătoare. Majoritatea studiilor sunt executate în medii controlate, foarte diferite de condițiile normale de exploatare, utilizând totuși parametri reali de aşchiere pentru a asigura validitatea/scalabilitatea rezultatelor obținute. Din nefericire, încă nu se poate face o distincție clară între performanțele obținute de metodele avansate care folosesc inteligența artificială și metodele clasice (cele care monitorizează nivelul de vibrații aplicând o simplă operație RMS pe nivelul amplitudinilor) [96].

4.3 Generarea sintetică a eşantioanelor de antrenare

Principalul impediment în implementarea tehnologiilor care folosesc inteligența artificială este dat de numărul mare de eşantioane cerute de procesul de antrenare. În condiții ideale, eşantioanele folosite pentru acest proces sunt generate experimental deoarece acestea pot îngloba toate caracteristicile, cunoscute sau ascunse, ce duc la o precizie mai bună a predicțiilor generate de rețea. Acest lucru este posibil însă doar pentru anumite aplicații, precum recunoașterea facială sau recunoașterea caracterelor scrise de mână, deoarece natura eşantioanelor este foarte comună (poze, melodii, videoclipuri etc).

Specificul problemei abordate, controlul vibrațiilor mașinilor-unelte, modelează direct structura fundamentală pe care un eşantion trebuie să o posedă. Pentru a putea asigura compatibilitatea datelor este necesar ca informațiile, atât cele de intrare cât și cele de ieșire, să fie compuse coerent pe baza fenomenelor/parametrilor ce urmează a fi modelați de rețea neuronală.

Datele de intrare ale acestui tensor sunt reprezentate de caracteristicile fizice, dinamice și geometrice pe care procesul urmărit le posedă. În cazul prelucrărilor prin aşchiere acestea sunt: materialul/proprietățile fizice ale semifabricatului, materialul/proprietățile fizice ale sculei aşchietoare, parametrii regimului de aşchiere, geometria sculei aşchietoare ș.a.m.d. Datele de ieșire, conform aplicației propuse sunt: turația (care poate fi determinată și analitic din datele de intrare), avansul (similar, poate fi determinat din datele de intrare) și amplitudinile vibrațiilor

aferente procesului într-o formă discretizată. Discretizarea pe benzi de frecvență se poate face în funcție de performanțele rețelei. Fiecare bandă folosită pentru monitorizare va adăuga practic încă o dimensiune tensorului. Se poate trage concluzia că utilizarea unui număr mare de benzi de frecvență poate duce la o performanță ridicată a rețelei. În realitate, numărul de benzi urmărite trebuie optimizat deoarece acesta influențează exponențial timpul de antrenare și numărul minim necesar de eșantioane.

4.3.1 Simularea procesului de aşchiere, calculul forțelor de aşchiere

După cum s-a arătat în Cap. 2.2.1.1.1, literatura de specialitate pune la dispoziție o varietate de modele analitice care pot fi utilizate în estimarea forțelor de aşchiere însă acestea introduc multe ipoteze simplificatoare. O alternativă este folosirea simulărilor cu elemente finite, discutată mai pe larg în Cap. 2.2.1.1.3, însă aceste metode introduc o problemă nouă legată de costurile computaționale. O posibilă soluție este reducerea numărului de elemente finite prin trecerea de la un model oblic (3D) la unul ortogonal (2D).

O abordare originală ce simplifică și mai mult analizele cu elemente finite la operațiile de frezare este prezentată în [37], prin schimbarea tipului de mișcare de generare din rotație în rectilinie, metoda îmbunătățită fiind independentă de numărul de dinți ai sculei aşchietoare. În esență, metoda propune: desfășurarea aşchierii generate de trecerea unui dinte al sculei aşchietoare, simularea ortogonală – rectilinie a procesului de

formare a aşchierii, compunerea spectrului de forțe de aşchiere ca funcție de numărul total de dinți, înfășurarea rezultatelor în sistemul polar aferent cinematicii procesului de aşchiere și extragerea forțelor de aşchiere totale prin conversia lor în sistem cartezian.

Datorită procesului de desfășurare (Fig. 4.10), variația grosimii trebuie ajustată prin intermediul unui factor de corecție calculat cu ajutorul vitezelor liniare (relația 4.1).

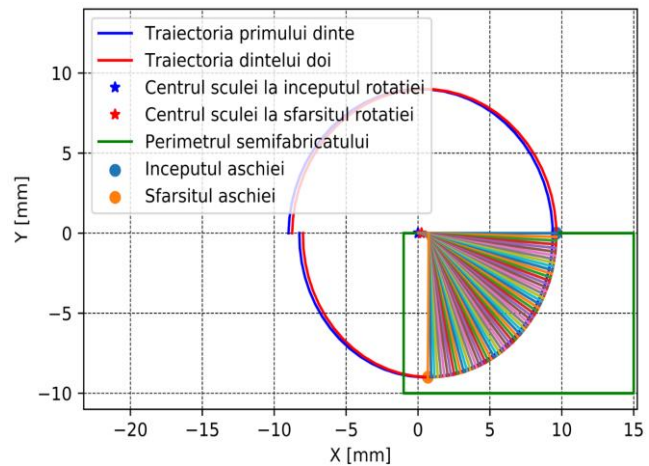


Fig. 4.10 Componentele geometrice [37]

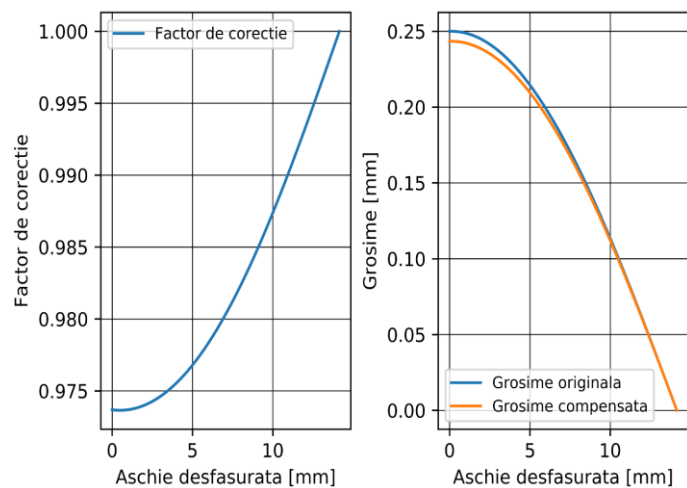


Fig. 4.12 Factorul de corecție S_c introdus procesului de desfășurare [37]

$$S_c(\emptyset) = \frac{S_{c_1}}{S_{c_2}} \quad 4.1$$

unde: S_{c_1} [m/s] → viteza instantanee a două puncte consecutive de pe traiectorie, I-ului dinte;
 S_{c_2} [m/s] → viteza instantanee a două puncte consecutive de pe traiectorie, II-lea dinte;
 \emptyset [°] → unghiul de rotație a sculei aşchietoare.

Factorul de corecție și variația grosimii corectate sunt prezentate în Fig. 4.12.

Costul computațional al unei simulări folosind această metodă a fost de 1,5 zile. Comparat cu echivalentul simulării oblice de 13,5 zile a rezultat o scădere cu 88.8889% a timpului de calcul.

4.3.2 Generarea de eşantioane dinamice de aşchiere folosind explorarea parametrică ghidată

Pornind de la structura eşantionului, se poate deduce faptul că numărul maxim, teoretic, de eşantioane unice care poate fi obținut este influențat direct de numărul total de variabile de intrare și domeniul de variație al fiecărei variabile (rezoluția dorită și/sau impusă fiind factorul discretizant). Putem numi acest ansamblu de date de intrare „spațiu parametric de variație” a sistemului studiat. În contextul prezentei cercetări, acest spațiu este definit de caracteristicile principale ale regimului de aşchiere care influențează în mod direct comportamentul dinamic la formarea aşchiei. Generarea unui set reprezentativ de eşantioane de antrenare reprezintă modul în care acest spațiu parametric este explorat în scopul expunerii meta-dependențelor cu intenția de a le inocula ulterior algoritmilor AI de control. Modul în care această explorare are loc influențează direct atât costul total de generare a setului de eşantioane cât și performanțele finale ale algoritmului de control AI.

O alternativă la explorările aleatorii sunt analizele de optimizare ghidate (Design Space Exploration – DSE), capabile să parcurgă aceste spații într-un mod semi-automat, online. Aceste analize evaluează răspunsurile obținute și optimizează constant configurațiile ulterioare.

O abordare unică ce implică acest gen de explorare, combinată cu metodele de simulare a proceselor de aşchiere, a fost propusă în lucrarea [41]. Similar cu lucrarea [37], aplicabilitatea, scalabilitatea și validitatea metodei au fost expuse prin intermediul unui exemplu, strunjirea longitudinală a semifabricatelor din oțel AISI1045.

În Fig. 4.21 este prezentată schema de detaliu a buclei de optimizare folosite pentru generarea de eşantioane aferente cazului vizat. După cum se poate observa, spațiul parametric pentru acest caz este definit de partea stângă a schemei, conținând parametri marcați cu portocaliu (a, b, r, V, f și loc). Restul parametrilor sunt folosiți pentru construcția modelului de simulare ortogonal, aceștia rămânând constanți. Limitarea spațiului parametric a fost făcută astfel: $a = -8 \dots + 8[^\circ]$; $b = 0 \dots 8[^\circ]$; $r = 0.02 \dots 0.1[mm]$; $V = 1 \dots 120 \left[\frac{m}{min} \right]$; $f = 0.1 \dots 2[mm]$.

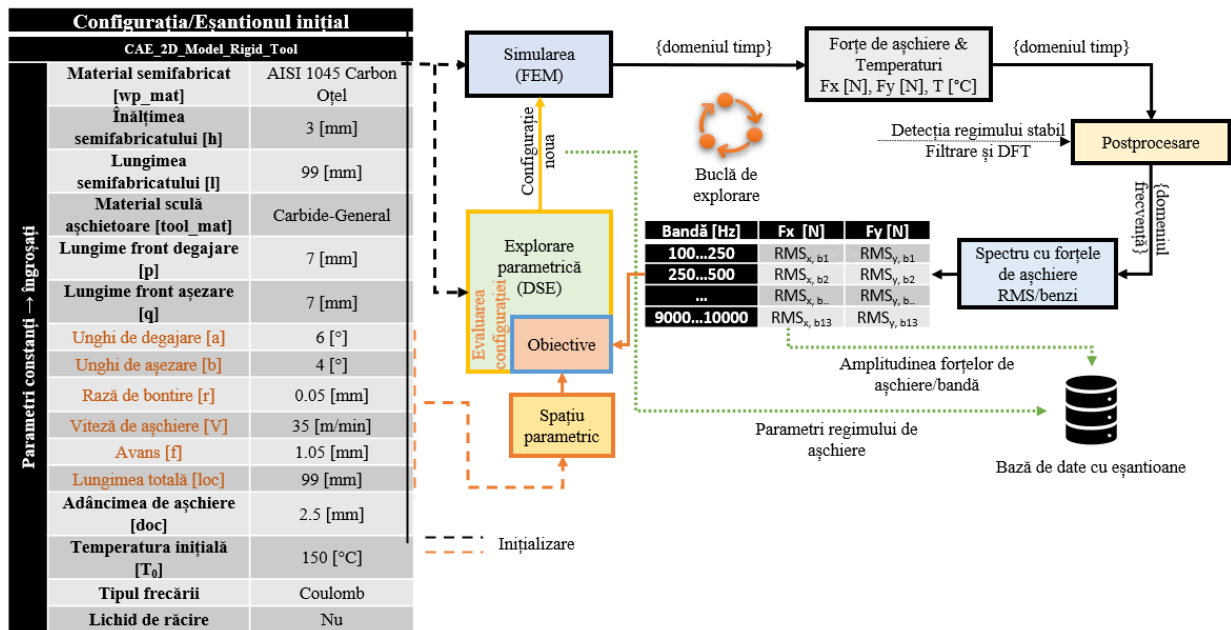


Fig. 4.21 Structura unei bucle de explorare parametrică folosită pentru generarea eșantioanelor dinamice caracteristice la așchiere [41]

Obiectivele setate pentru acest caz sunt specifice tipologiei de eșantion ce se dorește a fi generată: maximizarea ratei de îndepărtare de material prin intermediul parametrilor V și f cu minimizarea amplitudinilor vibrațiilor pe toate benzile de frecvență.

Regim de așchiere:	V		f		a		b		r	
Direcție:	F_x	F_y	F_x	F_y	F_x	F_y	F_x	F_y	F_x	F_y
Banda 1 (0.1...0.25 kHz)	0.350	0.380	0.230	0.150	-0.570	-0.580	-0.400	-0.450	-0.360	-0.340
Banda 2 (0.25...0.5 kHz)	0.160	0.240	0.480	0.370	-0.590	-0.630	-0.540	-0.500	-0.370	-0.330
Banda 3 (0.5...0.75 kHz)	0.200	0.250	0.750	0.660	-0.440	-0.470	0.000	0.090	-0.310	-0.310
Banda 4 (0.75...1 kHz)	0.160	0.250	0.540	0.230	-0.550	-0.630	-0.580	-0.570	-0.330	-0.310
Banda 5 (1...2 kHz)	0.260	0.280	0.480	0.280	-0.540	-0.590	-0.580	-0.620	-0.300	-0.260
Banda 6 (2...3 kHz)	0.020	0.050	0.640	0.200	-0.530	-0.810	-0.570	-0.560	-0.310	-0.030
Banda 7 (3...4 kHz)	-0.110	-0.140	0.610	0.030	-0.600	-0.860	-0.550	-0.230	-0.310	0.240
Banda 8 (4...5 kHz)	-0.260	-0.430	0.460	0.120	-0.600	-0.430	-0.580	-0.390	-0.180	0.140
Banda 9 (5...6 kHz)	-0.410	-0.520	0.360	0.060	-0.640	-0.250	-0.440	-0.270	-0.120	0.150
Banda 10 (6...7 kHz)	-0.590	-0.610	0.080	-0.030	-0.460	-0.120	-0.270	-0.160	0.150	0.180
Banda 11 (7...8 kHz)	-0.610	-0.490	-0.240	-0.380	-0.410	-0.180	-0.060	0.280	0.330	0.470
Banda 12 (8...9 kHz)	-0.460	-0.430	-0.360	-0.370	-0.330	-0.250	0.160	0.260	0.440	0.540
Banda 13 (9...10 kHz)	-0.440	-0.440	-0.370	-0.420	-0.290	-0.210	-0.040	0.120	0.290	0.450

Corelarea între parametrii de așchiere	V	f	a	b	r
V		-0	-0.1	-0.1	0.04
f			-0.1	-0.1	-0.2
a				0.33	-0.1
b					0.04

Legenda	Valoare	Descriere
1.000	Corelare direct proporțională	
0.000	Necorelat	
-1.000	Corelare invers proporțională	

Fig. 4.24 Corelarea datelor de intrare cu cele de ieșire generate de explorarea parametrică [41]

Pentru validarea datelor obținute s-a folosit o abordare empirică: interpretarea datelor obținute prin intermediul factorilor de corelare calculați între parametri variați, parte din spațiul de explorare, și amplitudinile obținute pe benzile de frecvență (Fig. 4.24). Trebuie observate câteva tendințe mecanice clare, cum ar fi faptul că viteza de așchiere V influențează asemănător ambele forțe de așchiere F_x, F_y , ceva de așteptat. Se observă o schimbare de semn între banda 6 și 7. Această schimbare validează o altă ipoteză aplicată în industrie, care leagă creșterea vitezei de așchiere cu îmbunătățirea stabilității dinamice. Se poate observa o altă tendință anticipată, legată de influența avansului f ; acesta acționează predominant în direcția forței F_x . În plus, se poate observa ca această ipoteză nu se aplică atunci când se analizează banda 3, efectul sugerând apariția unui fenomen armonic.

Un alt parametru foarte important de investigat este unghiul de degajare α . După cum se poate observa, acesta are o corelare invers proporţională cu ambele forţe de aşchiere, ceva anticipat, însă datele sugerează că acţionează predominant la frecvenţe joase şi medii. Aceeaşi tendinţă se poate observa şi pentru unghiul de aşezare b .

Ultimul parametru investigat individual este raza de bontire r . După cum a fost deja menţionat, acest parametru este asociat gradului de uzare pe care scula aşchietoare îl are. Analizând datele obţinute se poate observa această influenţă la frecvenţe înalte, dar nu atât de evident la frecvenţe joase.

4.4 Determinarea funcţiilor de transfer la maşinile-unelte

Pentru descrierea corectă/completă a fenomenul dinamic de generare la prelucrările prin aşchiere nu este suficientă doar modelarea procesului de formare a aşchii. În continuare, atenţia va fi îndreptată pe dezvoltarea soluţiilor care vor permite cuplarea forţelor de aşchiere simulate cu caracteristicile dinamice aferente maşinilor-unelte. Această cuplare reprezintă practic determinarea coeficienţilor de rigiditate k_* şi de amortizare c_* ca funcţii dependente de parametri sistemului generator, aferent operaţiei de strunjire longitudinală. Şi în acest caz, validarea conceptelor propuse în această teză de doctorat pornesc de la cazuri simple de prelucrare, capabile să expună şi să evalueze scalabilitatea metodologiei.

Configuraţia experimentală este formată dintr-un strung CNC PO PY GIM PLG-42 pe care este montat un cuţit de strung cu plăcuţe amovibile SVJBL 2020K 16, produs de compania SANDVIK. Modelările, analizele şi măsurătorile au fost efectuate cu ajutorul suitei de soluţii hardware şi software dezvoltate de compania Siemens (NX, Simcenter, Simcenter HEEDS MDO, Simcenter Testlab şi Simcenter SCADAS XS).

4.4.2 Evaluarea modală a sistemului generator la strunjirea longitudinală cu cuţitul de strung SVJBL 2020K 16

Pentru a putea realiza o evaluare a comportamentului modal la operaţia de strunjire longitudinală cu cuţitul de strung SVJBL 2020K 16, acest capitol de cercetare s-a concentrat pe cuplarea celor două componente principale ce formează sistemul generator, sculă aşchietoare - semifabricat (Fig. 4.39).

Analizele efectuate au avut acelaşi scop: prezentarea caracteristicilor critice şi a parametrilor importanţi care influenţează modul în care dinamica sistemului generator poate interacţiona cu fenomenul de autovibraţie.

Din punct de vedere geometric, semifabricatul este o bară plină cu diametrul de 42 [mm] şi o lungime totală de 230 [mm], ambele dimensiuni fiind limitate constructiv de strungului CNC selectat pentru executarea testelor fizice.

Proprietățile de material utilizate sunt identice cu cele folosite pentru cuțitul de strung. Pe lângă parametri deja studiați, variația forțelor de așchiere și variația ieșirii în consolă a sculei așchietoare, în acest studiu s-a mai introdus și o variație a distanței (tot o ieșire în consolă) dintre vârful generator și zona de prindere în bacurile universalului (Fig. 4.39). Diametrul este constant, însă parametrul de ieșire în consolă a semifabricatului poate varia în intervalul 0 ... 210 [mm], limitat de lungimea bacurilor de prindere (20 [mm]) și de spațiul de lucru al MU.

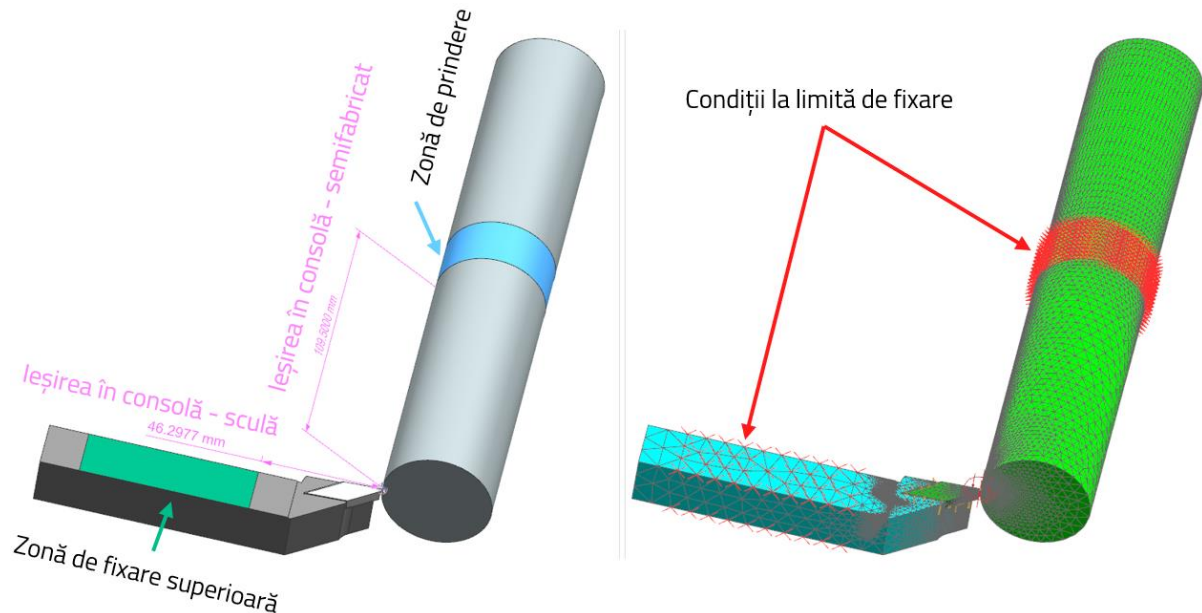


Fig. 4.39 Ansamblu cuțitul strung - semifabricat idealizat geometric (stânga) – discretizat cu elemente finite (dreapta)

Prinderea bacurilor a fost modelată în analiza cu elemente finite similar cu prinderea cuțitului de strung, zona cilindrică ce descrie prinderea fiind constrânsă. O particularitate în această modelare este felul în care forțele de așchiere cvasistatice au fost aplicate pe model. În practică, dinamica procesului de formare a așchii generează forțe de așchiere ce încarcă identic ambele componente, cu semn contrar. Deoarece în această analiză procesul de formare a așchii nu este simulat (mai multe detalii în Cap. 2.2.1.1.3 forțele sunt introduse folosind o metodă originală, ce reduce zona de interacțiune la elemente unidimensionale (1D) de tip RBE2 și CBAR, asupra cărora este aplicată o condiție la limită dedicată modelării forțelor de pretensionare la șuruburi.

Analizând rezultatele obținute (Fig. 4.41), se poate remarca faptul că fiecare direcție de încărcare induce modificarea semnificativă a frecvenței unui mod natural de vibrație diferit. Variația forței de așchiere de pe direcția F_x modifică substanțial un mod natural de vibrație ce se manifestă prin deformație predominant în direcția F_y , acest mod fiind puternic corelat cu modul 1 de vibrație obținut în analiza modală izolată doar pe cuțitul așchietor.

În ceea ce privește variația forței de încărcare pe direcția F_y , se poate observa o influență la fel de semnificativă asupra modului 2 de vibrație, mod de încovoiere pe direcția Z . Analizând forma de deformare pentru acest caz, se observă că acest mod este indus de semifabricat, fără o contribuție semnificativă de la cuțitul de strung.

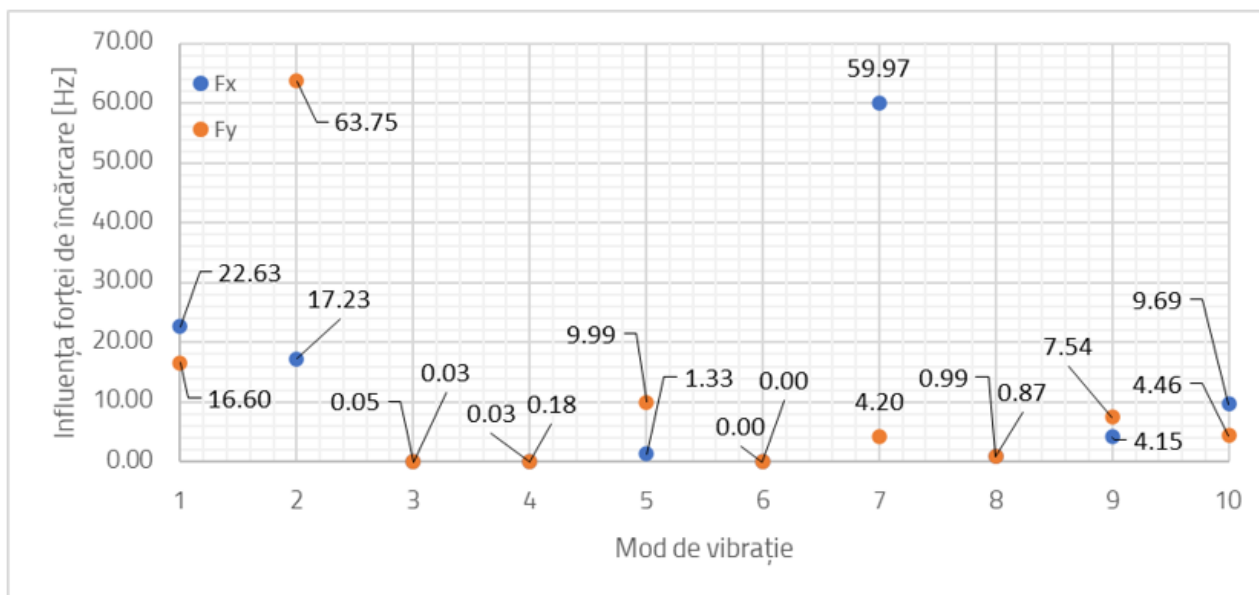


Fig. 4.41 Influența maximă a variației forțelor de aşchiere asupra frecvențelor modurilor naturale – sistem generator

Pe lângă variația modului 7, influența pretensionării pe direcția F_x este semnificativă și pentru modurile 1, 2 și 10 (Fig. 4.41), primele două fiind moduri de încovoiere ce se manifestă predominant la semifabricat, iar modul 10 este un mod complex ce indică apariția fenomenului de cuplare modală între cele două sisteme.

Similar, influența pretensionării pe direcția F_y este resimțită nu doar pe modul 2. Modurile naturale de vibrație 1, 7 și 10 (Fig.4.41) prezintă și ele modificări semnificative în ceea ce privește frecvența la care se manifestă. Modurile 1 și 7 sunt moduri de încovoiere pe direcția F_x , însă modul 5 se deosebește prin forma sa, fiind un mod de torsiune a semifabricatului în lungul axei arborelui principal.

O analiză comparativă a rezultatelor obținute până în acest punct sugerează eliminarea forțelor de pretensionare (generate de forțele de aşchiere) din lista celor mai importanți parametri ce pot interveni/modifica comportamentul modal la procesul de strunjire longitudinală. Influențele sunt vizibile, după cum s-a arătat în analizele individuale, însă comparativ cu cele generate de variația ieșirilor în consolă acestea sunt cu câteva ordine de mărime mai mici. Pentru o mai bună vizualizare a complexității influențelor celor doi parametri rămași s-a executat încă o serie de analize de sensibilitate concentrate pe generarea suprafețelor de răspuns ale sistemului. Aceste grafice sunt generate folosind o interpolare de tip Kriging factorială, interpolare capabilă să gestioneze cu suficientă precizie complexitatea spațiului de răspuns calculat [102]. Analizând rezultatele obținute pentru primul mod de vibrație (Fig. 4.46) se observă faptul că parametrul de ieșire în consolă a semifabricatului este predominant, însă influența ieșirii în consolă a sculei aşchietoare este comparabilă.

Pentru modul 2 de vibrație (Fig. 4.47) se observă o pondere mult mai redusă a influenței parametrului de ieșire în consolă a sculei aşchietoare, însă rezultă și o asimetrie în influența parametrului de ieșire în consolă a semifabricatului.

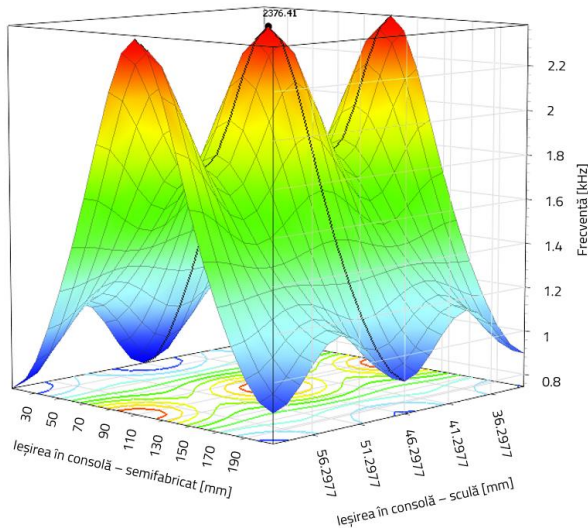


Fig. 4.46 Analiză de sensibilitate – suprafață de răspuns Kriging pentru modul 1 de vibrație

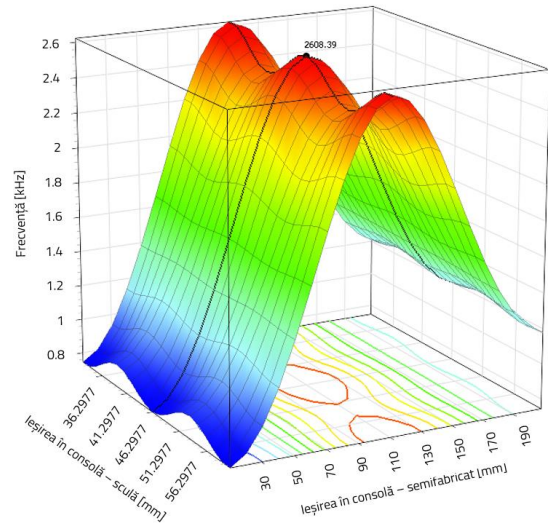


Fig. 4.47 Analiză de sensibilitate – suprafață de răspuns Kriging pentru modul 2 de vibrație

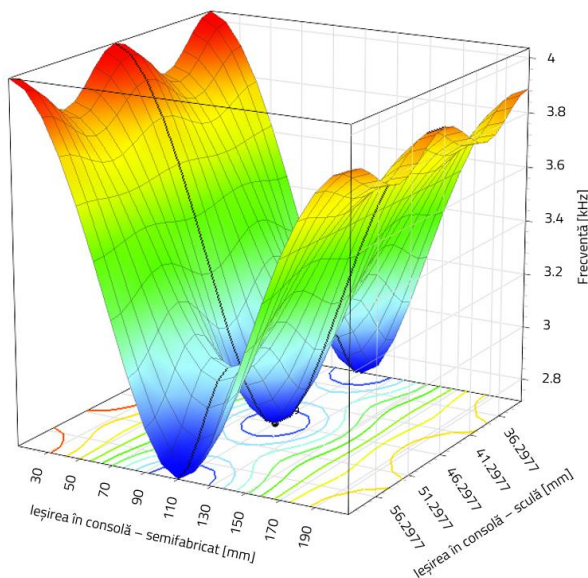


Fig. 4.48 Analiză de sensibilitate – suprafață de răspuns Kriging pentru modul 3 de vibrație

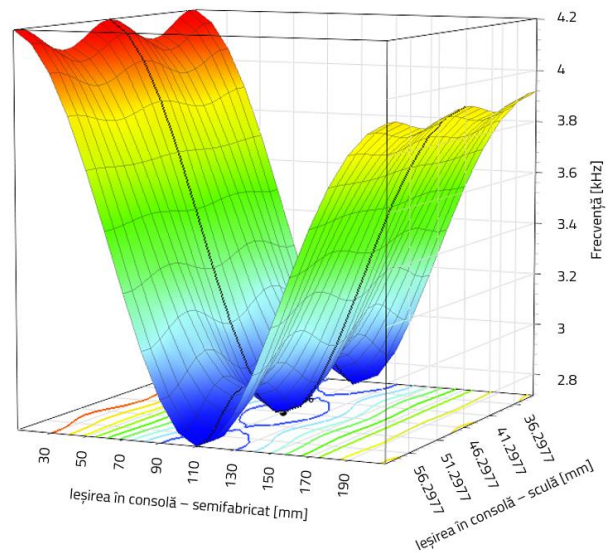


Fig. 4.49 Analiză de sensibilitate – suprafață de răspuns Kriging pentru modul 4 de vibrație

Modurile 3 și 4 (Fig. 4.48 și Fig. 4.49) prezintă o asimetrie similară în ceea ce privește influența parametrului de ieșire în consolă a semifabricatului dar, în același timp, și o inversare a distribuției cu vârfuri de rezonanță poziționate limitrof pe domeniile de variație.

4.4.3 Proiectarea/Prototiparea sistemului de măsurare a funcțiilor de transfer la strunjirea longitudinală pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42

Din punct de vedere operațional, comportamentul modal al sistemului generator poate fi calculat și/sau măsurat complet doar atunci când toate componentele structurale și conexiunile sunt luate în considerare. Nu toate aceste componente au o contribuție semnificativă în final, însă eliminarea lor de la bun început nu este recomandată.

Având la bază cele discutate în Cap. 4.4.2, se poate deduce faptul că folosirea analizei cu elemente finite este condiționată de modelarea întregului strung CNC PO PY GIM PLG-42 pentru obținerea funcțiilor de transfer efective. În contextul prezentei cercetări s-a decis utilizarea metodei experimentale pentru determinarea acestor caracteristici, deoarece această metodă este mai precisă.

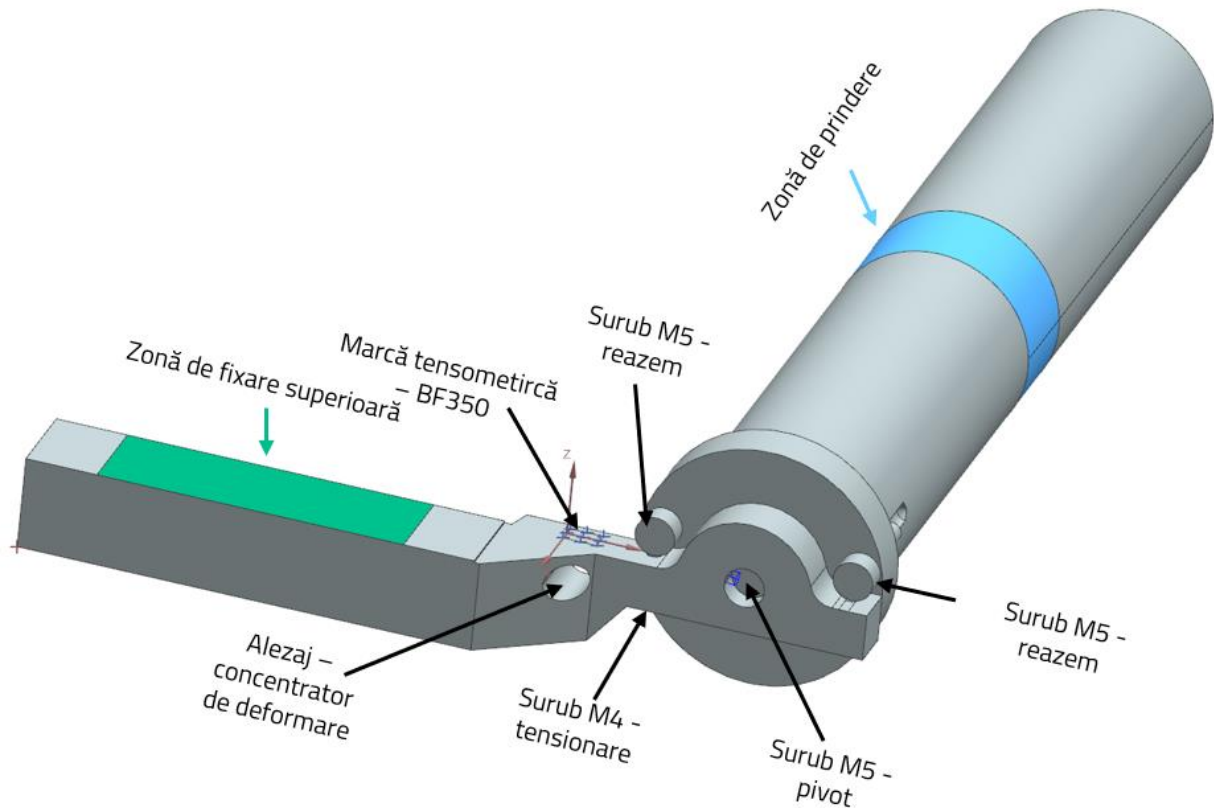


Fig. 4.56 Prototip de măsurare a funcțiilor de transfer pe direcția F_x – model CAD

Pentru realizarea prototipului s-a apelat din nou la analizele cu elemente finite, acestea fiind folosite pentru dimensionarea, validarea și optimizarea conceptelor de bază. Principalul obiectiv urmărit în această parte a cercetării a fost realizarea unui dispozitiv capabil să modeleze starea de tensiune indusă de operația de strunjire longitudinală pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42, folosind cuțitul de strung SVJBL 2020K 16. Pe lângă acuratețea geometrică s-a impus și elaborarea unei soluții ce permite variația celor trei parametri analizați (forțele de încărcare și cele două ieșiri în consolă). Datorită constrângerilor constructive, rotația arborelui principal a MU nu poate fi blocată, soluția propusă având capacitatea de a materializa starea de tensiune prin reazeme locale.

S-a decis măsurarea funcțiilor de transfer utilizând dispozitive diferite pe cele două direcții. Dispozitivul proiectat pentru măsurarea pretensionării pe direcția F_x (Fig. 4.56) a fost realizat pornind de la informațiile geometrice ale sculei așchietoare discutate în Cap. 4.4.1.

Pentru măsurarea efectivă a forţei aplicate este utilizată o marcă tensometrică (BF350) plasată pe partea superioară a sculei aşchietoare. Starea de pretensionare este obţinută prin intermediul unei configuraţii pivotante în jurul axei de rotaţie a semifabricatului.

Pentru măsurarea forţelor de pretensionare în direcţia F_y s-a folosit aceeaşi abordare, cu o soluţie constructivă mai simplă, în lipsa condiţiilor speciale impuse de rotaţia liberă a arborelui principal. Dispozitivul presupune modelarea cât mai fidelă a cuţitului de strung SVJBL 2020K 16, cu adăugarea unei zone ce permite utilizarea unui şurub M4 care favorizează aplicarea solicitării între cele două componente (Fig. 4.61).

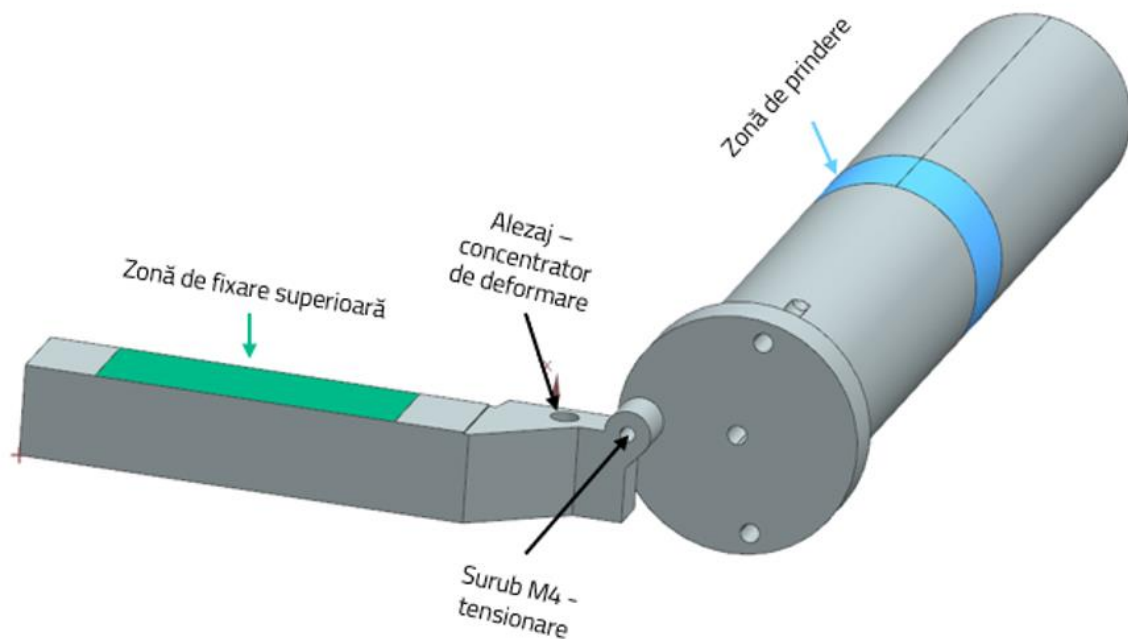


Fig. 4.61 Prototip de măsurare a funcţiilor de transfer pe direcţia F_y – model CAD

După cum se poate observa, modelul semifabricatului este reutilizat și pentru această configurație, acesta nefiind condiționat din punct de vedere geometric de nici un aspect funcțional.

4.4.3.2 Instrumentarea și calibrarea sistemului de măsurare a preîncărcării

După cum s-a menționat în capitolele precedente, sistemul de măsurare dezvoltat pentru această cercetare are ca scop măsurarea inertanțelor punctului generator luând în considerare și efectul forțelor de pretensionare induse de procesul de aşchiere. Pentru a putea realiza acest tip de măsurătoare s-a decis utilizarea mărcilor tensometrice BF350 – 3AA, optimizate din punct de vedere funcțional în capitolul 4.4.3.1, cuplate cu un sistem de achiziție dezvoltat special pentru această aplicație. Calibrarea sistemului s-a realizat folosind configurații care au permis reproducerea condițiilor de prindere de pe mașina-unealtă testată (PO PY GIM PLG-42).

Partea de instrumentare a presupus utilizarea unei configurații de tip punte Wheatstone, care în forma ei completă utilizează patru elemente rezistive active. Datorită constrângerilor

geometrice, utilizarea punţii complete nu a fost posibilă, fiind adoptată configuraţia sfert-punte ce foloseşte doar un element activ.

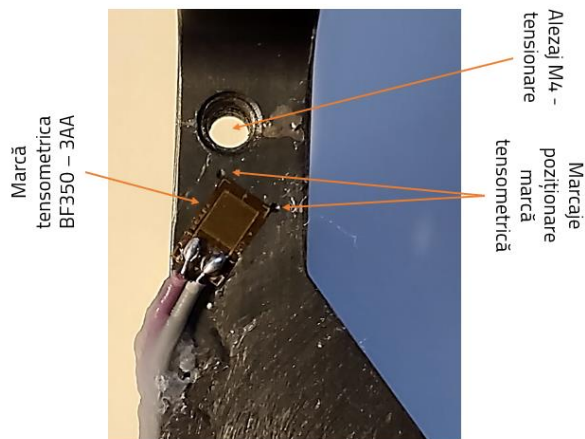


Fig. 4.78 Instrumentarea dispozitivului de măsurare pe direcția F_x cu marca tensometrică BF350-3AA

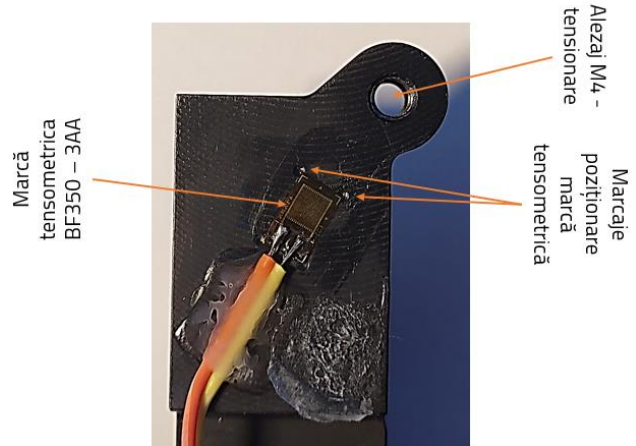


Fig. 4.79 Instrumentarea dispozitivului de măsurare pe direcția F_y cu marca tensometrică BF350-3AA

Conversia digitală este efectuată prin intermediul unui modul ADC specializat (Fig. 4.81), HX711, capabil să cuantifice comportamentul electric al punții Wheatstone cu o rezoluție de 24 [bit] (vezi Cap. 2.3.2.1).

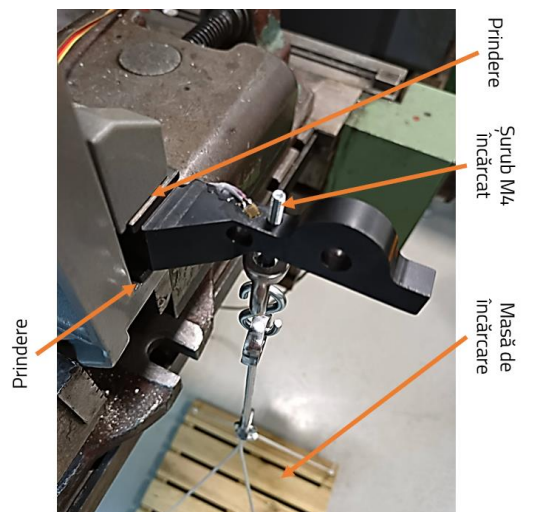


Fig. 4.80 Configurarea de calibrare a dispozitivului de măsurare pe direcția F_x

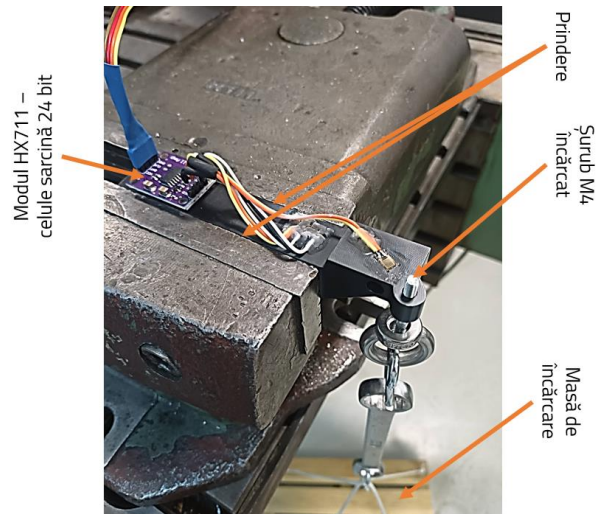


Fig. 4.81 Configurarea de calibrare a dispozitivului de măsurare pe direcția F_y

Întreg procesul digital este programat și gestionat prin intermediul unei plăci de dezvoltare Arduino Uno conectată direct la modulul HX711, care transmite datele finale către calculator. Componenta software special dezvoltată pentru această aplicație este disponibilă în Anexa 3 – Firmware pentru dispozitivele de măsurare a forțelor de pretensionare – dispozitive utilizate la măsurarea inertanțelor pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42. Inducerea stării de tensiune în dispozitive a presupus folosirea unei configurații ce a permis orientarea prinderilor conform direcțiilor vizate și aplicarea unor mase cunoscute în vederea etalonării.

Calibrarea s-a concentrat doar pe o singură poziție de ieșire în consolă a sculei aşchietoare, $s_c = 32.2977$ [mm], cea mai rigidă.

După cum se poate observa în Fig. 4.80, prinderea dispozitivului de măsurare pe direcția F_x a fost făcută prin intermediul unor menghine, obținând orientarea corectă în raport cu suprafața orizontală. Aplicarea forței de încărcare a presupus utilizarea aceluiași tip de șurub M4, conectat la o masă de încărcare ce se autoreglează normal la suprafața orizontală atunci când este lăsată liberă. În cazul dispozitivului de măsurare pe direcția F_y (Fig. 4.81), configurația este mai simplă, fiind utilizată doar o menghină.

Procedura de calibrare a presupus citirea valorilor digitalizate în 22 de poziții de încărcare, pornind de la 0 [kgf] până la valori apropiate de cele aferente unei forțe de încărcare de ~ 61 [kgf]. S-a decis calibrarea sistemelor în domeniul de forțe 0 ... 600 [N], domeniu de forțe de aşchiere valid pentru studiile ce urmează a fi realizate în prezenta lucrare. Masa totală de încărcare a fost validată pentru fiecare poziție folosind o balanță electronică dispusă pe aceeași suprafață de bazare a sistemului și care are o precizie de măsurare de +/- 1 [g], incrementul folosit fiind de ~ 2.5 [kgf].

4.4.3.3 Realizarea măsurătorilor experimentale



Fig. 4.86 Configurarea generică pentru măsurarea inertențelor punctului generator la strungul CNC PO PY GIM PLG-42

Testele fizice au fost efectuate pe două configurații: una pentru măsurarea inertențelor cuțitului de strung SVJBL 2020K 16 montat pe sistemul port sculă și cealaltă pentru măsurarea inertențelor vârfului generator folosind dispozitivele dezvoltate în capitolele precedente.

Măsurarea, achiziția și post procesarea datelor au fost făcute folosind un accelerometru produs de PCB (333B30), conectat la un sistem Siemens SCADAS XS și folosind soluția

software Siemens Test Lab (Fig. 4.86). Măsurarea inertanţelor presupune utilizarea unui ciocan modal produs tot de PCB (086C03) pentru a genera referinţa energetică necesară.

În primă fază a fost cartografiată inertanţa punctului generator pe cele două direcţii, F_x şi F_y , pe întreg domeniul de reglaj al maşinii-unelte $X - Z$. În acelaşi timp, au fost testate 3 valori ale parametrului de ieşire în consolă a sculei aşchietoare ($sc = 32.2977$ [mm] (Fig. 4.88); 48.2977 [mm] şi 61.2977 [mm] (Fig. 4.89)), parametru ce a prezentat influenţe semnificative asupra comportamentului dinamic conform analizelor efectuate în Cap. 4.4.2.

Instrumentarea zonei măsurate a presupus îndepărtarea componentelor amovibile şi montarea accelerometrului folosind o substanţă specială. Pentru măsurarea pe direcţia F_y , accelerometrul a fost montat cât mai aproape de punctul generator, folosind aceeaşi substanţă specială de montaj (Fig. 4.90 şi Fig. 4.91). Domeniul de reglaj $X - Z$ a fost definit folosind ca referinţă „0” punctul de intersecţie dintre axa de rotaţie a arborelui principal şi poziţia minimă X aferentă bacurilor universalului.

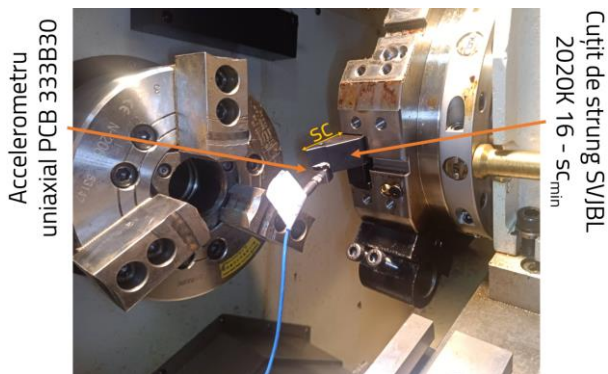


Fig. 4.88 Măsurarea inertanţei pe direcţia F_x la cuţitul de strung SVJBL 2020K 16 fără preîncărcare – $sc = 32,2977$ mm

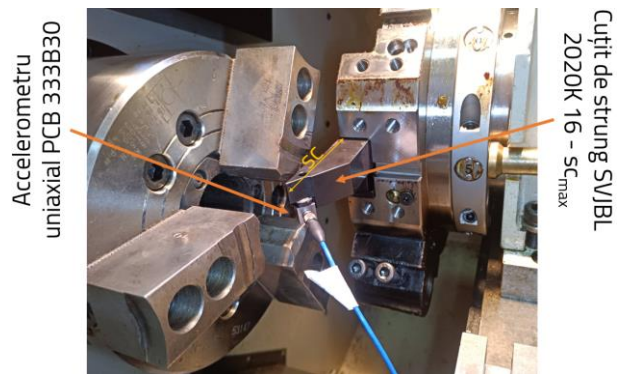


Fig. 4.89 Măsurarea inertanţei pe direcţia F_x la cuţitul de strung SVJBL 2020K 16 fără preîncărcare – $sc = 61,2977$ mm

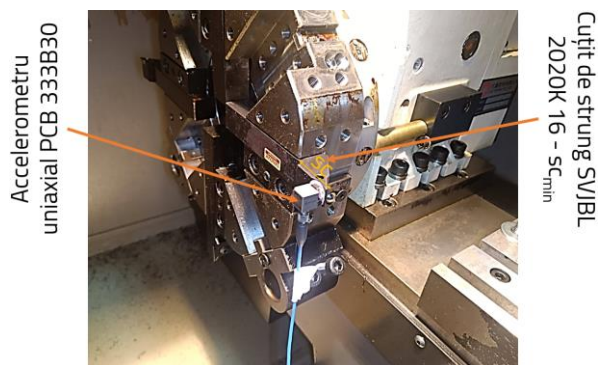


Fig. 4.90 Măsurarea inertanţei pe direcţia F_y la cuţitul de strung SVJBL 2020K 16 fără preîncărcare – $sc = 32,2977$ mm

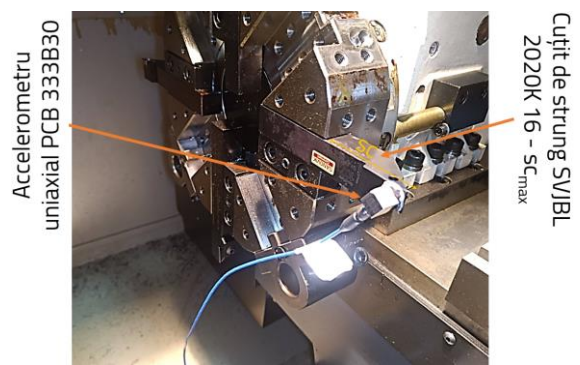


Fig. 4.91 Măsurarea inertanţei pe direcţia F_y la cuţitul de strung SVJBL 2020K 16 fără preîncărcare – $sc = 61,2977$ mm

Măsurătorile efective au presupus lovirea zonei punctului generator folosind ciocanul modal, în direcţia de interes şi repetând fiecare măsurătoare de 5 ori pentru a asigura precizia rezultatelor. Rezultatele măsurate în poziţia $X = 0$ [mm] şi $Y = 0$ [mm] pot fi, teoretic, comparate cu rezultatele calculate în Cap. 4.4.1, deoarece acest punct reprezintă poziţia cu rigiditatea maximă a maşinii-unelte. Dacă se analizează aceste rezultate pe ambele direcţii,

Fig. 4.96 și Fig. 4.97, se poate observa că tendințele rigidității dinamice sunt compatibile, însă decalate. Aspectul legat de decalaj poate fi explicat simplu prin diferența majoră de rigiditate a celor două configurații; simulările induc o rigidizare masivă a sistemului mecanic, pe când măsurătorile introduc rigiditățile reale și amortizările întregului lanț cinematic al mașinii-unelte.

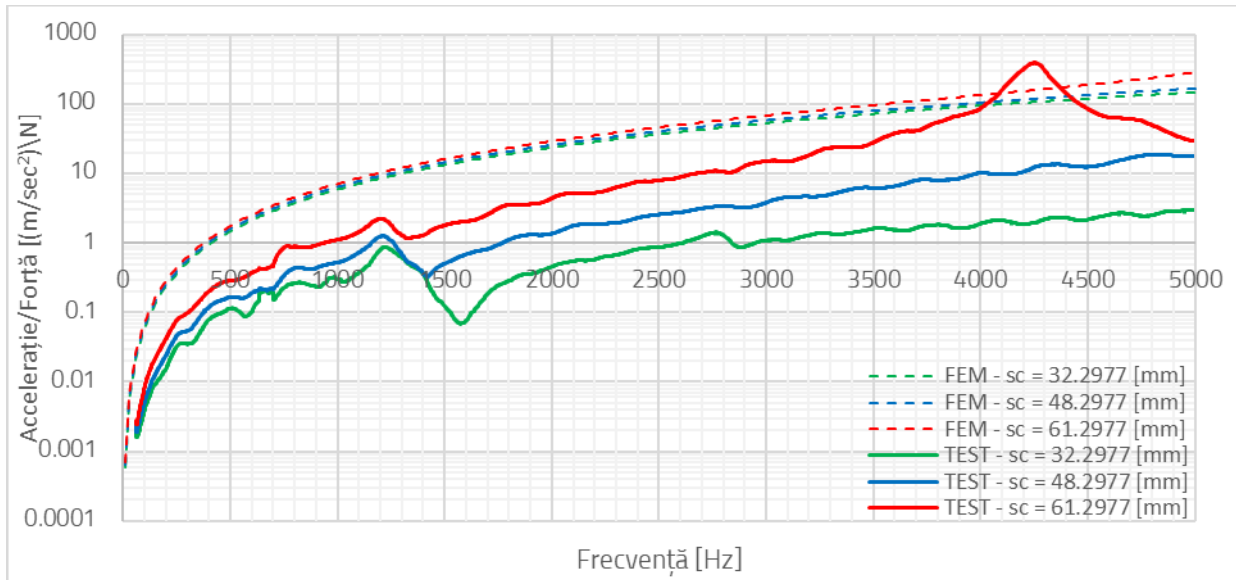


Fig. 4.96 Inertanțele pe direcția F_x pentru poziția minimă, medie și maximă (sc) a cuțitului de strung SVJBL 2020K 16 pentru coordonatele $X = 0 \text{ mm}$; $Z = 0 \text{ mm}$ măsurate pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42 și comparate cu inertanțele calculate cu simulările FEM

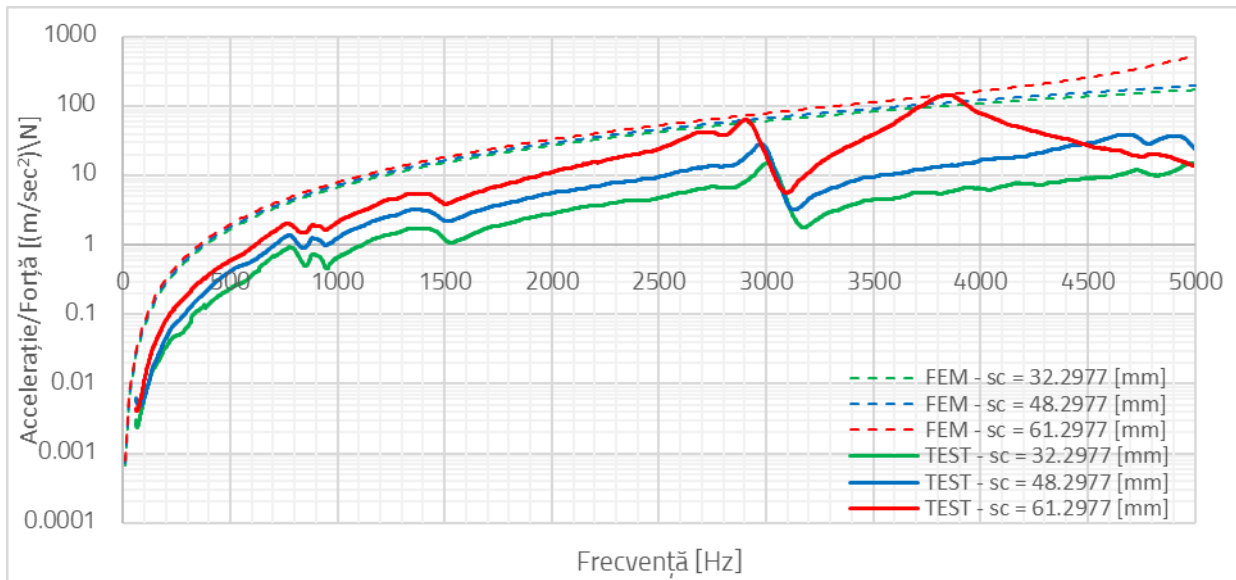


Fig. 4.97 Inertanțele pe direcția F_y pentru poziția minimă, medie și maximă (sc) a cuțitului de strung SVJBL 2020K 16 pentru coordonatele $X = 0 \text{ mm}$; $Z = 35 \text{ mm}$ măsurate pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42 și comparate cu inertanțele calculate cu simulările FEM

Pentru ambele direcții pot fi observate vârfuri de flexibilitate independente și dependente de parametrul sc . Din punct de vedere fizic, vârfurile independente pot fi asociate comportamentului dinamic a mașinii-unelte, iar cele dependente, comportamentului dinamic izolat la cuțitul de strung.

Rezultatele obținute în această parte a cercetării au confirmat necesitatea adăugării parametrilor $X - Z$ ca și variabile în spațiul de explorare propus în Cap. 4.3.2.

Măsurarea inertanțelor sistemul generator cu pretensionare, folosind dispozitivele special concepute, a fost executată urmând aceeași procedură. Diferit față de măsurătorile precedente este faptul că semifabricatul este materializat în acest caz, aspect ce poate influența dinamica sistemului prin simpla sa masă.

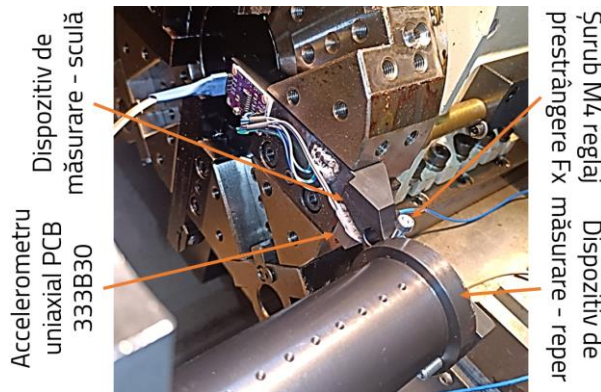


Fig. 4.104 Configurarea sistemul de măsurare a inertanțelor pe direcția F_x cu preîncărcare variabilă, $s_{C\text{constant}} = 32,2977 \text{ mm}$, $X_{\text{constant}} = 21 \text{ mm}$

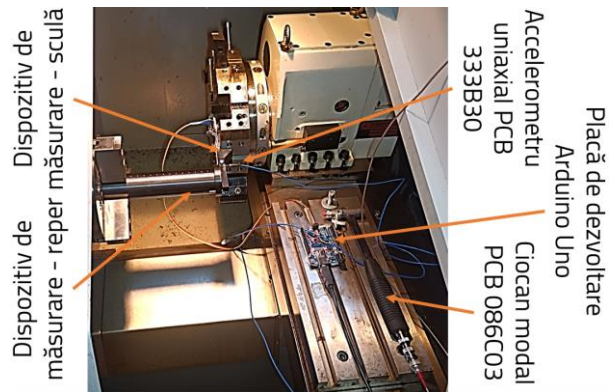


Fig. 4.105 Configurarea sistemul de măsurare a inertanțelor pe direcția F_x cu preîncărcare variabilă, $s_{C\text{constant}} = 32,2977 \text{ mm}$, $X_{\text{constant}} = 21 \text{ mm}$

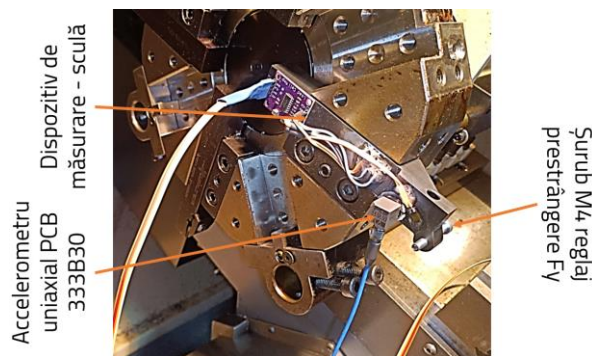


Fig. 4.106 Configurarea sistemul de măsurare a inertanțelor pe direcția F_y cu preîncărcare variabilă, $s_{C\text{constant}} = 32,2977 \text{ mm}$, $X_{\text{constant}} = 21 \text{ mm}$

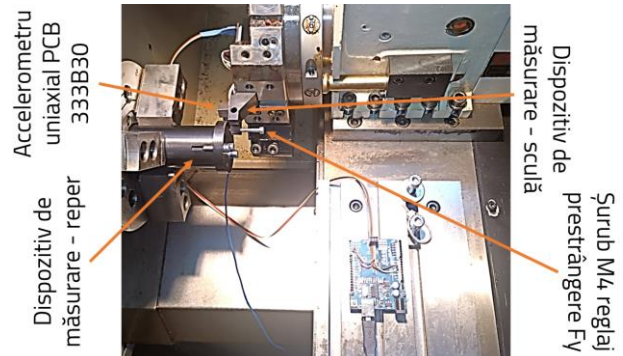


Fig. 4.107 Configurarea sistemul de măsurare a inertanțelor pe direcția F_y cu preîncărcare variabilă, $s_{C\text{constant}} = 32,2977 \text{ mm}$, $X_{\text{constant}} = 21 \text{ mm}$

Datorită faptului că dispozitivele au fost calibrate doar pentru montajul aferent configurației $s_c = 32.2977 \text{ [mm]}$, măsurătorile efectuate nu expun posibilele influențe pe care acest parametru le poate avea asupra inertanțelor.

Sistemul a fost conceput pentru măsurarea unui singur diametru de prelucrare a semifabricatului, $\Phi = 21 \text{ [mm]}$, prin urmare spațiul de reglaj $X - Z$ este definit în acest caz cu X constant. Măsurătorile au fost efectuate pe 5 poziții ale acestui parametru, $Z = 30, 60, 90, 120$ și 150 [mm] , folosind aceeași referință.

După cum se poate observa în Fig. 4.104 și Fig. 4.105, dispozitivul de pretensionare a fost montat în suportul port-sculă, accelerometrul fiind dispus cât mai aproape de zona punctului

generator teoretic. Similar, configurația pentru măsurarea inertanțelor pe direcția F_y (Fig. 4.106 și Fig. 4.107) a presupus montarea dispozitivului în capul revolver și poziționarea accelerometrului pe direcția corectă de măsurare.

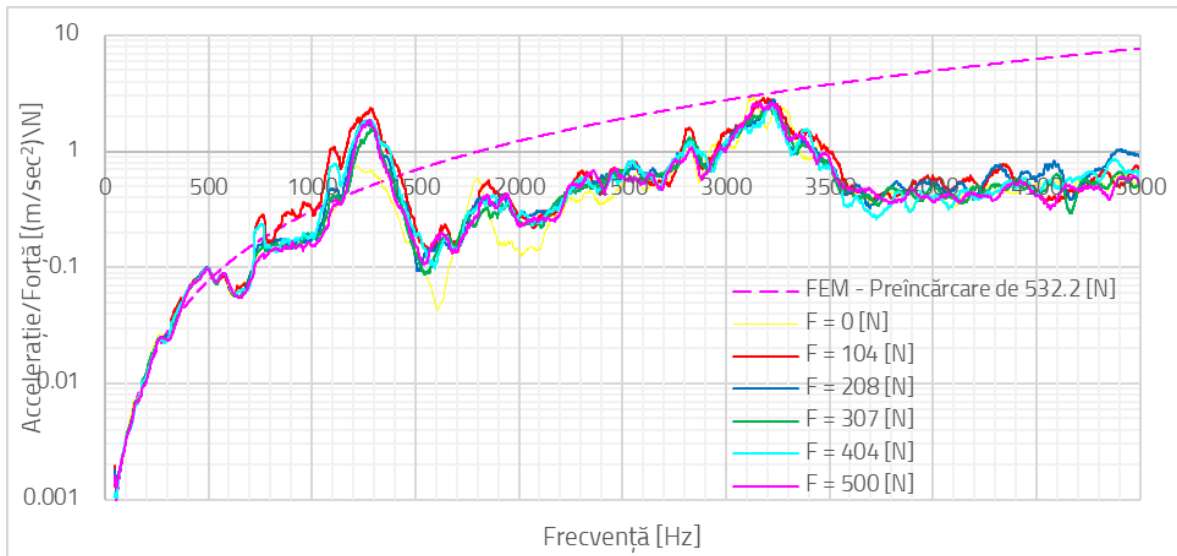


Fig. 4.1 Inertanțele pe direcția F_x măsurate pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42 cu dispozitivul de pretensionare în poziția $X = 21 \text{ mm}$ $Z = 30 \text{ mm}$, ieșirea în consolă minimă $sc = 32.2977 \text{ mm}$ și referința cea mai apropiată calculată cu FEM

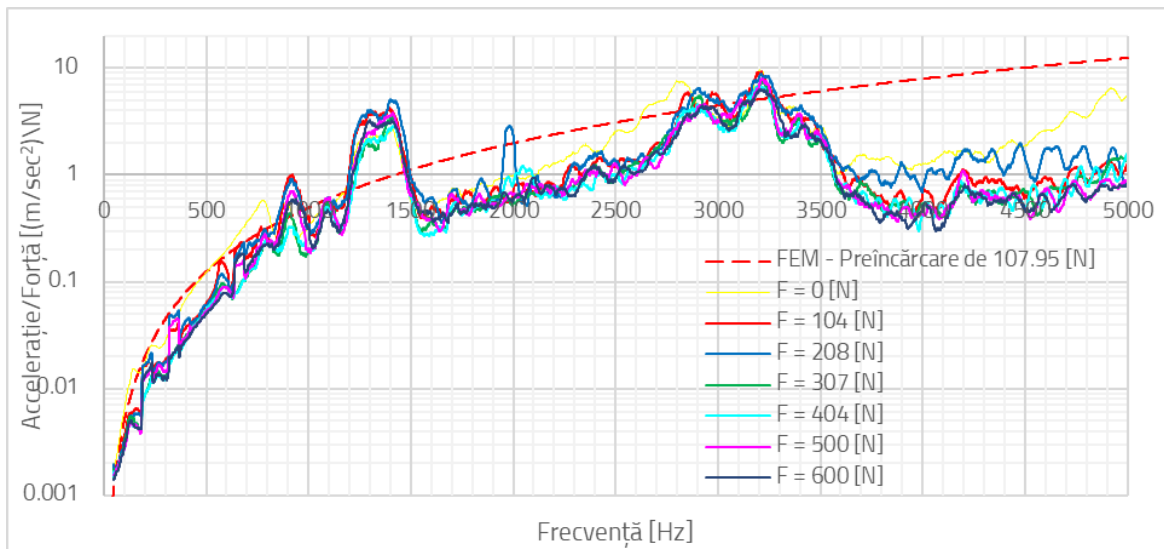


Fig. 4.2 Inertanțele pe direcția F_y măsurate pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42 cu dispozitivul de pretensionare în poziția $X = 21 \text{ mm}$ $Z = 30 \text{ mm}$, ieșirea în consolă minimă $sc = 32.2977 \text{ mm}$ și referința cea mai apropiată calculată cu FEM

Reglajul forței de pretensionare este realizat prin intermediul șuruburilor M4, valoarea de pretensionare fiind confirmată prin intermediul calculatorului și a sistemului de achiziție dezvoltat în Cap. 4.4.3.2. S-a decis măsurarea inertanțelor pentru fiecare configurație de la 0 la 600 [N] cu un increment de 100 [N].

Prima configurație testată este cea prezentată în Fig. 4.108 și Fig. 4.109 aferentă inertanțelor pe direcțiile F_x respectiv F_y . Analizând rezultatele se observă că sistemul generator prezintă

variații semnificative la diferitele stări de preîncărcare, însă acestea sunt minimizate de caracteristica dinamică a întregului sistem.

Pentru claritate, și având aceleași ipoteze simplificatoare legate de modul în care constrângerile aplicate în analizele FEM/MEF pot influența dinamica răspunsului structural, s-a decis adăugarea curbei de inertanțe aferente simulării sistemului generator cu preîncărcarea de 532.2 [N]. Similar analizei izolate la cuțitul de strung, pentru ambele direcții, tendințele dinamice sunt corelate. Pentru cazul F_x se pot observa două zone de interes, scăderea rigidității din jurul frecvenței de ~1400 [Hz] și punctul de corelare a măsurătorilor cu rezultatele simulate de la 3200 [Hz]. Scăderea de rigiditate poate avea mai multe explicații însă în contextul prezentei lucrări acest aspect nu este relevant, important de înțeles fiind fenomenul de la 3200 [Hz]. Pentru ambele direcții se poate observa că după atingerea acestei frecvențe critice, comparativ cu inertanțele calculate, decalajul este mai pronunțat.

4.6 Antrenarea și testarea rețelelor neuronale cu eșantioane sintetice

După cum a fost prezentat în Cap. 4.1 și Cap. 4.2, inteligența artificială folosește o varietate mare de soluții și metode pentru optimizarea performanțelor de antrenare și predicție.

Structura rețelei neuronale studiată în prezentul capitol poate fi descrisă prin intermediul Fig. 4.128. Stratul de intrare conține doar doi neuroni reprezentând cei doi parametri, sc și rp . Stratul de ieșire este format din 20 de neuroni, fiecare reprezentând valoarea RMS a accelerației pe o bandă de frecvență ce trebuie estimată de rețea. Această structură reprezintă baza oricărei soluții de sistem de detecție și/sau control a fenomenelor studiate de prezenta lucrare, complexitatea spațiului parametric vizat fiind fundamentală în construcția ei. Straturile ascunse pot varia atât ca număr cât și prin numărul de neuroni definiți pe fiecare strat. Alegerea unei configurații optime pentru definirea acestor straturi ascunse presupune balansarea performanței de predicție cu costurile computaționale.

Într-o aplicație inginerască reală, un sistem de control activ al oricărui fenomen dinamic presupune o reacție rapidă și precisă a sistemului coroborată cu o capacitate ridicată de auto-antrenare corectă, ghidată de configurațiile ce generează comportamente (eșantioane) noi.

Prezenta cercetare este concentrată pe o componentă redusă a noțiunii de eșantion propus, analiza sistemului integral putând fi subiectul unor studii viitoare avansate, unde se poate adăuga și conceptul de agent discutat în Cap. 4.1. O variantă completă a sistemului imaginat ar presupune existența acestui agent capabil să discrimineze corect semnale măsurate online pe sistemele monitorizate/controlate și, la nevoie, să declanșeze atât acțiuni de corecție pentru evitarea apariției fenomenului de autovibrație, cât și acțiuni de auto-antrenare pentru acțiunile fără efect sau cele care înrăutățesc starea dinamică a sistemului. Această descriere sumară are la bază utilizarea unui concept de buclă de reacție, similar cu cele discutate în Cap.

3.3, unde este complementară validarea și pre-antrenarea modulului fundamental de estimare a stării dinamice a proceselor de aşchiere.

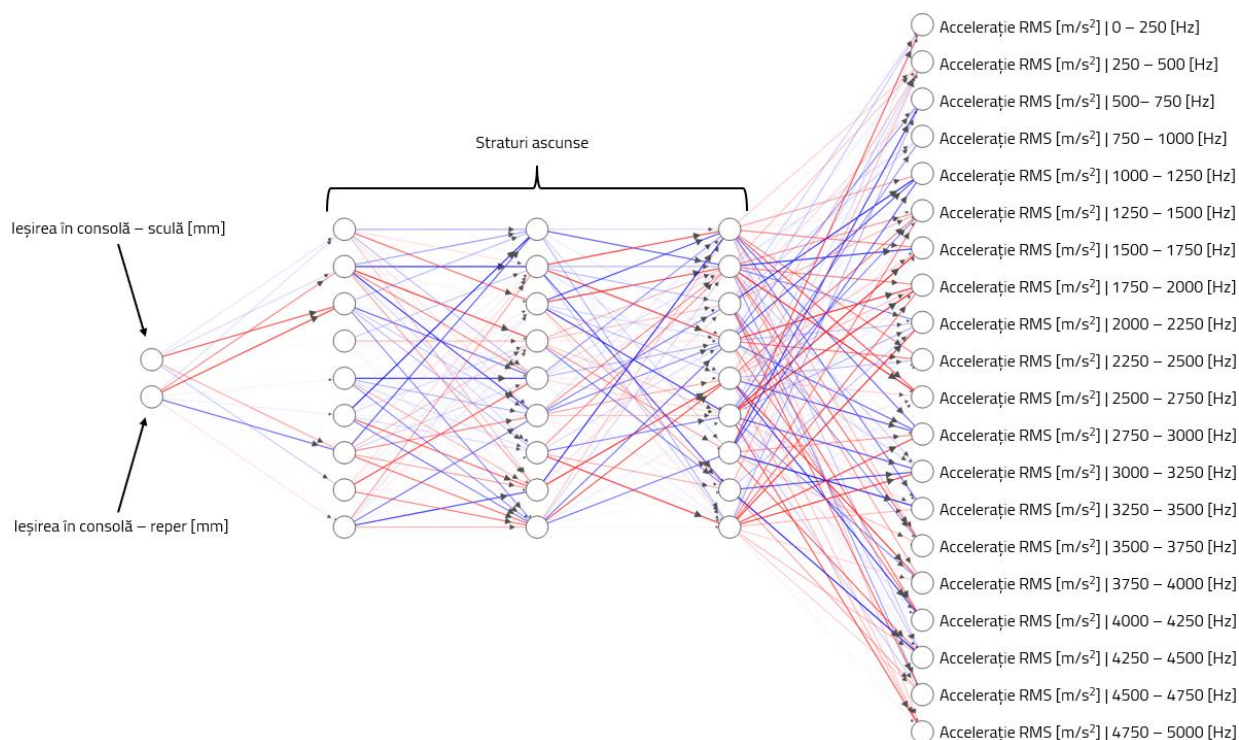


Fig. 4.128 Structura rețelei neuronale de estimare a accelerațiilor punctului generator

Având la bază datele sintetice obținute în Cap. 4.5.1, date ce pot fi calculate și hibrid folosind funcțiile de transfer reale măsurate în Cap. 4.4.3.3, a fost posibilă construcția unui colecții de 6061 eşantioane dinamice aferente cazului de aşchiere vizat în spațiul geometric de reglaj al MU, dat de parametrii sc și rp . Folosind acest set de date s-au construit mai multe configurații de rețele neuronale, testate cu scopul de a expune gradul lor de precizie și aspectele critice ce pot influența atât precizia cât și performanțele computaționale.

Pe baza informațiilor de convergență, de evoluție a pierderilor și performanță computațională au fost selectate și testate configurații ce influențează comportamente benefice de antrenare obținându-se în final Tabel . Acest tabel (plus Anexa 5) prezintă în esență evoluția acestui proces de explorare manuală a posibilităților de configurare și reglaj a rețelelor neuronale folosite în estimarea spectrelor de încărcare dinamică la procesele aşchiere pentru seturi de date cu complexitate diferită.

Pentru a facilita identificarea variantelor constructive testate, în prezenta cercetare s-a decis utilizarea unor nume sugestive, spre exemplu N2_N69_N20, reprezentând o rețea neuronală având straturile vizibile cu 2 neuroni pe intrare și 20 pe cel de ieșire, la care s-a mai adăugat un strat invizibil cu 69 neuroni.

Principalele configurații testate și rezultatele obținute sunt prezentate în Tabel 4.3. Varianta completă, cu toate testele executate poate fi găsită în Anexa 5 – Tabel de centralizare a tuturor

configurațiilor testate la rețelele neuronale. Construcție, hiperparametri, activări și preciziile raportate.

Optimizarea hiperparametrilor a fost făcută manual, având ca țintă atingerea unei precizii de predicție de 90% cu un cost computațional minim.

Pentru analiza critică a performanțelor computaționale ale celor 3 funcții de activare folosite la antrenarea rețelelor neuronale s-a decis utilizarea unui metric normalizat, produsul dintre numărul parametrilor de antrenare și numărul de epoci utilizat.

Tabel 4.3 Principalele configurații testate în vederea generării rețelelor neuronale de predicție a accelerațiilor sistemului generator

Iterația	Structura rețelei neuronale				Hiper-parametri				Precizie [%]					
	Strat de intrare	Strat ascuns 1	Strat ascuns 2	Strat de ieșire	Parametrii	Rată de antrenare	Epoci	Lot	Activare					
									ReLU		LeakyReLU		PReLU	
								Fx	Fy	Fx	Fy	Fx	Fy	
1	2	0	0	20	20	0.001	100	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	2	9	0	20	227	0.001	2000	50	77.38	97.41	82.76	97.75	83.46	96.97
9	2	9	0	20	227	0.0005	2000	50	81.51	95.74	78.64	97.67	83.55	97.48
11	2	9	0	20	227	0.0005	3000	75	75.71	97.17	80.61	97.94	86.91	97.18
13	2	9	0	20	227	0.00025	3000	100	78.29	97.57	79.86	97.48	79.60	97.64
16	2	4	5	20	157	0.0005	1000	50	76.94	95.78	76.95	97.61	75.10	95.52
18	2	4	5	20	157	0.0005	1000	100	70.75	97.63	66.12	97.65	76.52	97.32
19	2	4	5	20	157	0.00025	1000	100	72.81	97.39	73.61	97.32	67.42	97.52
22	2	15	0	20	365	0.001	1500	50	81.02	98.01	81.71	98.44	87.00	97.67
25	2	15	0	20	365	0.001	1500	75	80.38	97.14	84.05	97.75	87.41	97.85
26	2	15	0	20	365	0.001	2000	75	84.76	97.81	87.39	97.70	90.21	97.24
27	2	15	0	20	365	0.001	3000	75	86.82	97.23	84.02	98.55	88.96	97.38
28	2	7	8	20	265	0.001	100	50	75.29	95.75	78.17	97.80	77.12	96.41
29	2	7	8	20	265	0.001	500	50	75.77	97.65	76.38	97.50	85.39	96.71
30	2	7	8	20	265	0.001	1000	50	83.08	97.47	84.75	97.67	83.58	97.48
31	2	7	8	20	265	0.001	2000	50	78.43	97.51	85.74	97.42	81.79	98.13
35	2	7	8	20	265	0.001	2000	75	81.90	97.86	84.10	97.68	82.97	96.52
39	2	69	0	20	1607	0.0005	2000	50	89.54	98.76	87.50	98.24	90.43	99.07
42	2	69	0	20	1607	0.00025	4000	50	86.86	98.39	88.78	98.60	88.99	98.51
43	2	69	0	20	1607	0.0005	2000	75	89.87	98.46	89.41	98.32	88.14	97.64
44	2	69	0	20	1607	0.0005	3000	75	89.24	97.77	90.41	98.22	89.62	98.27
47	2	10	59	20	1879	0.0005	500	50	89.64	98.41	88.72	97.05	90.32	97.24
49	2	10	59	20	1879	0.00025	1000	50	90.36	98.14	86.78	97.12	89.26	98.43
50	2	10	59	20	1879	0.00025	2000	50	89.25	98.83	88.74	98.54	90.04	97.92
52	2	10	59	20	1879	0.00025	4000	50	87.92	98.45	90.43	99.00	85.51	97.93
59	2	20	49	20	2089	0.0005	2000	50	87.83	98.04	89.46	98.98	83.49	98.87
60	2	20	49	20	2089	0.0005	3000	50	88.92	97.87	86.66	98.66	90.32	99.14
61	2	20	49	20	2089	0.0005	4000	50	89.58	98.53	89.84	98.60	88.05	98.84
64	2	30	39	20	2099	0.001	1000	50	90.43	97.99	88.10	98.87	88.28	98.85
66	2	30	39	20	2099	0.0005	1000	50	88.88	98.79	90.02	97.59	88.27	98.45
68	2	30	39	20	2099	0.00025	2000	50	89.36	98.11	88.98	96.89	90.85	98.03
71	2	40	29	20	1909	0.001	500	50	88.23	98.12	84.71	96.65	88.06	98.66
72	2	40	29	20	1909	0.001	1000	50	89.71	98.77	87.38	98.51	88.32	97.70
74	2	40	29	20	1909	0.0005	2000	50	89.20	98.37	89.73	98.80	86.05	98.28
76	2	40	29	20	1909	0.0005	2000	100	87.98	97.89	89.90	98.55	89.12	97.49

Se poate observa că pentru direcția F_x , activarea PReLU este cea mai eficientă, urmată de activarea ReLU. Pentru cazul direcției F_y , se confirmă aceeași funcție de activare ca fiind cea mai eficientă, urmată de activarea LeakyReLU. O diferență semnificativă apare totuși în acest caz; activarea PReLU prezintă o evoluție ce sugerează posibilitatea de a îmbunătăți și mai mult precizia obținută prin creșterea numărului de epoci.

4.7 Concluzii

A patra revoluției industriale (Industry 4.0) a introdus și promovat agresiv utilizarea tehnologiilor digitale în vederea creșterii nivelului de autonomie a centrelor de prelucrare. Exista deja o fundație digitală solidă implementată prin intermediul interfețelor de comandă numerică computerizată (CNC → Industry 3.0) însă aceasta nu avea capacitatea de a asigura monitorizarea/controlul fenomenelor dinamice complexe precum autovibrația. Inteligența artificială reprezintă la ora actuală vârful de lance a acestei revoluții, prezența ei în domeniile industriale (și nu numai) crescând exponențial.

Numeroase echipe de cercetători lucrează intens să implementeze și să testeze aceste tehnologii pentru detecția și controlul fenomenelor dinamice, înregistrând rezultate promițătoare în ceea ce privește acuratețea (90 ... 100%).

Implementarea acestor tehnici presupune utilizarea mai multor aparate matematice precum STFT, WT, WPD, HHT, EMD, VMD sau LMD, toate folosite în preprocesarea semnalelor fizice măsurate, cu scopul de a le face compatibile cu sistemul inteligent de control.

Principalul impediment întâlnit la implementările tehnologiilor AI îl reprezintă mărimea setului de date necesar antrenării. În contextul controlului autovibrațiilor la MU această problemă devine și mai evidentă prin prisma costurilor ridicate pe care le implică testarea fizică.

O alternativă la testarea fizică o reprezintă utilizarea simulărilor cu elemente finite. Deși tehnica de calcul a evoluat mult în ultimii ani, generarea unui set corespunzător de date de antrenare implică costuri mari computaționale ce readuc în discuție aplicabilitatea acestor metode în procesul de antrenare AI. Există totuși o metodă de îmbunătățire a acestor performanțe computaționale prin convertirea problemelor oblice de așchiere în probleme ortogonale ce pot crește eficiența cu ~90%.

Pentru a putea reconstrui corect dinamica indusă de un proces așchietor oblic, în special la operațiile complexe precum frezarea, a fost propusă o metodă inovatoare de desfășurare/înfășurare a așchiei/rezultatelor ce poate fi extinsă la orice tip de prelucrare.

Un alt aspect critic în ceea ce privește generarea setului de antrenare este cel legat de definirea și modul de explorare a spațiului parametric de interes. Această etapă se poate face aleatoriu sau folosind algoritmi speciali de explorare ce pot expune interdependențele sistemului mult mai eficient (număr redus de eșantioane → buget de timp și hardware redus). Prezenta

cercetare a folosit o soluție comercială, Siemens HEEDS MDO, în sinergie cu simularea procesului generator care a permis generarea a 25 de cazuri de aşchiere într-un timp scurt, cu resurse computaţionale modeste, validând scalabilitatea metodei.

Evaluarea componentei modale a întregului sistem generator se poate face prin intermediul simulărilor cu elemente finite însă, deseori, apar dificultăţi de modelare din cauza informaţiilor incomplete de proiectare. Alternativa este folosirea testelor fizice, acestea fiind oricum mai precise comparativ cu simulările. În ambele variante, inertanţele punctul generator pot fi cuplate pentru obţinerea acceleraţiilor finale măsurabile fizic cu ajutorul unui accelerometru.

Extinderea spaţiului parametric de variaţie a problemelor de autovibraţie la aşchiere trebuie să includă doar parametri importanţi ce pot influenţa inertanţele punctului generator. În acest sens au fost executate analize detaliate de sensibilitate atât izolate la scula aşchietoare cât şi cu modelarea semifabricatului şi a interacţiunii celor două componente. Pe baza rezultatelor obţinute din analiza redusă doar la ansamblul sculă aşchietoare – semifabricat s-a concluzionat faptul că principalul parametru de influenţă pentru inertanţe este ieşirea în consolă a semifabricatului faţă de universal.

Forţele de aşchiere au şi ele un potenţial ridicat de modificare a comportamentului modal al sistemului, fiind urmate de ieşirea în consolă a sculei aşchietoare.

Comportamentele modale şi influenţele pe care parametrii de variaţie o au asupra inertanţelor prezintă diferenţe semnificative în funcţie de componenta forţei de aşchiere ($F_n = F_x; F_t = F_y$ pentru cazul de strunjire longitudinală). Determinarea experimentală a acestor funcţii de transfer se face uzual direct pe scula aşchietoare, fără modelarea semifabricatului şi/sau a interacţiunii de aşchiere.

Pentru a modela mai precis comportamentul modal al întregii MU s-a decis elaborarea unor dispozitive speciale de pretensionare a sistemului, cu modelarea semifabricatului şi cu posibilitatea de măsurare a forţelor de pretensionare. Au fost dezvoltate două dispozitive separate, pentru fiecare direcţie testată, proiectarea fiind concentrată pe menţinerea fidelităţii geometrice a cuţitului de strung SVJBL 2020K 16 şi pe depăşirea constrângerilor constructive/cinematice regăsite la MU testată (CNC PO PY GIM PLG-42).

Variantele originale au fost optimizate folosind o altă sinergie complexă de explorare parametrică, unde au fost folosite multiple soluţii statice şi dinamice prezente în suita de soluţii numerice Siemens SimCenter 3D. Variabilele de intrare au vizat optimizarea sensibilităţii zonelor instrumentate. Măsurarea forţelor de pretensionare a fost realizată folosind mărci tensometrice aplicate pe zonele cheie ale dispozitivelor, cu dezvoltarea soluţiei hardware şi software necesară la procesul de etalonare şi în utilizare. Etalonarea s-a efectuat folosind o procedură unică, care a permis orientarea şi solicitarea corectă a dispozitivelor folosind mase cunoscute. Liniaritatea rezultatelor a confirmat validitatea procedurii.

Măsurarea inertanţelor a fost făcută atât pentru cazul general, fără a avea scula aşchietoare în contact cu semifabricatul, cât şi pentru cazul la care sunt aplicate dispozitivele de pretensionare. Au fost folosiţi senzori dezvoltati de compania PCB, aici fiind inclus şi ciocanul modal, cu soluţii de achiziţie şi procesare date dezvoltate de compania Siemens (Siemens TestLab). Obiectivul principal în această fază a cercetării a fost cartografierea stării de rigiditate a vârfului generator (inertanţele) în funcţie de parametri geometrici şi funcţionali vizaţi de fiecare caz de testare, acestea urmând a fi cuplate cu spectrele forţelor de aşchiere determinate în prima parte a lucrării. Au fost identificate comportamente critice corelate cu variaţia parametrilor investigaţi pentru ambele configuraţii, confirmând necesitatea extinderii spaţiului parametric utilizat la generarea eşantioanelor de antrenare. În această fază a cercetării a fost posibilă şi compararea rezultatelor simulate cu cele obţinute din măsurători, interpretarea lor validând capacitatea conceptului de a capta comportamentele dinamice complexe chiar şi atunci când se folosesc modelări reduse ale sistemului generator.

O caracteristică vizibilă, preconizată, importantă pentru ambele cazuri este diferenţa complexităţii răspunsului dinamic în funcţie de direcţie. Variaţia complexităţii pe direcţia Fx este mult mai mare comparativ cu variaţia pe direcţia Fy . Acest aspect influenţează drastic structura şi parametrii de definire ai soluţiei AI, expunerea diferenţelor fiind importantă pentru viitoarele cercetări.

Componenta cheie a conceptului fundamental propus în această teză de doctorat este validarea aplicabilităţii tehnologiilor AI în vederea estimării comportamentelor dinamice nedorite ale maşinilor-unelte în funcţionare. Expunerea acestei caracteristici s-a realizat experimental prin testarea mai multor modele de reţele neuronale, cu diferite structuri şi parametri de antrenare. După cum s-a preconizat, gradul ridicat de complexitate a variaţiei caracteristicilor modale pe direcţia Fx complică mult procesul de determinare a celei mai eficiente variante de antrenare, cu costuri substanţiale asupra performanţelor computaţionale. În acelaşi timp, s-a confirmat faptul că pentru această aplicaţie nu există o abordare standard ce poate fi folosită la construcţia soluţiilor AI, comportamentele exotice obţinute atestând caracteristica volatilă a tehnologiei ce poate fi interpretată atât negativ, prin dificultatea obţinerii rezultatelor dorite, cât şi pozitiv prin gradul mare de flexibilitate.

5 CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

5.1 Concluzii generale

Teza de doctorat s-a concentrat pe realizarea de studii teoretice și experimentale amănunțite pe baza cărora s-au putut elabora concepte inovative cu aplicații reale în controlul activ al fenomenelor dinamice la procesele de aşchiere, folosind tehnologii cu inteligență artificială. Lucrarea propune, testează și validează metode, modele numerice și prototipuri experimentale inovative în context sinergic, care permit realizarea unei platforme generice de implementare a acestor tehnologii pe o gamă largă de mașini-unelte și procese de fabricație.

Teza de doctorat este structurată în trei părți. În prima parte a lucrării se abordează în detaliu stadiul actual al aparatului matematic și a tehnologiilor ce permit analiza fenomenelor dinamice la procesele de aşchiere. Pe baza concluziilor produse de această investigație se decide evaluarea stadiului actual al metodelor de detecție și control a fenomenului de autovibrație. Rezultatele investigațiilor au arătat gradul ridicat de dificultate în ceea ce privește înțelegerea, modelarea, măsurarea și controlul acestui fenomen, concluziile contribuind direct la elaborarea soluției propuse în partea a treia a lucrării. Multiplele cercetări și experimente realizate permit formularea unor concluzii, după cum urmează:

- I. Analiza fenomenelor dinamice la procesele de aşchiere presupune evaluarea separată a componentelor mecanice fundamentale constituate precum comportamentul modal, influența frecărilor și fenomenul de autogenerare, componenta modală fiind considerată independentă de restul celorlalte.
- II. Metodele existente de control al vibrațiilor la operațiile de aşchiere presupun, în primă fază, detecția comportamentelor negative. Cuantificarea fenomenului se realizează folosind o gamă largă de senzori și metode, obținerea controlului fiind dirijată de tehnici cu grad variat de complexitate. Din această analiză s-a putut concluziona că un sistem de control activ cu inteligență artificială va adopta o schemă de funcționare similară celor prezente în modelele cu buclă de reacție, reacție monitorizată prin intermediul „agenților”.
- III. Studiile prezentate în cea de-a treia parte a lucrării au fost concentrate strict pe conceperea, implementarea și testarea tuturor componentelor implicate în realizarea platformei de dezvoltare a sistemelor propuse de teză. Principalele aspecte urmărite în această parte au fost:
 - a. Definirea parametrilor constructivi și de control la rețelele neuronale;
 - b. Prezentarea componentelor de pre/post procesare necesare în implementarea soluțiilor de control activ al fenomenului de autovibrație pe baza celor mai recente lucrări de specialitate;

- c. Definirea conceptului de eşantion de antrenare cu prezentarea problemelor de eficienţă computaţională atunci când sunt folosite simulările oblice;
- d. Elaborarea unei soluţii inovative pentru diminuarea costului computaţional la simularea proceselor de aşchiere, cu asigurarea scalabilităţii soluţiei propuse;
- e. Introducerea metodelor moderne de explorare parametrică cu scopul eficientizării numărului de simulări necesare prezentării interdependenţelor parametrice;
- f. Evaluarea graduală a sistemului generator cu scopul prezentării parametrilor care pot induce modificări substanţiale ale caracteristicii modale;
- g. Proiectarea şi optimizarea sistemelor de măsurare a inertaţelor punctului generator cu aplicarea forţelor de pretensionare;
- h. Instrumentarea şi etalonarea prototipurilor de măsurare;
- i. Realizarea testelor experimentale:
 - i. concentrate pe determinarea funcţiilor de transfer ale sistemului generator nepretensionat, ale sculei de referinţă SVJBL 2020K 16;
 - ii. concentrate pe determinarea funcţiilor de transfer ale sistemului generator cu modelarea semifabricatului şi a stărilor de tensiune induse de procesul de formare a aşchei;
- j. Cuplarea inertaţelor simulate şi măsurate cu spectrele forţelor de aşchiere în scopul comparării;
- k. Construcţia, antrenarea şi testarea soluţiilor AI cu arătarea performanţelor şi a parametrilor critici de influenţă.

Pe baza concluziilor formulate şi a rezultatelor generate experimental se poate formula o concluzie generală care dovedeşte capabilitatea, flexibilitatea, scalabilitatea şi performanţa metodologiei propuse în implementarea sistemelor AI la procesele de control a operaţiilor de aşchiere. În consecinţă, se poate afirma ca obiectivele principale ale tezei de doctorat au fost atinse prin intermediul platformei de dezvoltare propusă.

5.2 Contribuţii personale

Originalitatea prezentei teze de doctorat este garantată prin caracterul inovativ pe care toate metodele, structurile şi soluţiile constructive le prezintă. Pe scurt, se pot sintetiza contribuţiile personale după cum urmează:

- Prezentarea stadiului actual în ceea ce priveşte analiza fenomenelor dinamice la procesele de aşchiere prin prisma celor mai recente lucrări de specialitate;
- Prezentarea stadiului actual al realizărilor pe plan mondial în ceea ce priveşte controlul activ al fenomenelor de autovibraţie la maşinile-unelte;
- Expunerea dificultăţilor de implementare a tehnologiilor cu inteligenţă artificială (AI) pe maşinile-unelte în scopul controlării fenomenelor dinamice;

- Propunerea unei metode noi, inovative, de generare de eşantioane sintetice a spectrelor forţelor de aşchiere folosind metode avansate de simulare (Deform 3D, AdvantEdge). În contextul acesteia s-a dezvoltat o soluţie nouă pentru reducerea complexităţii machetelor numerice, aplicabilă la majoritatea operaţiilor de aşchiere;
- Cuplarea metodelor de simulare a proceselor de aşchiere cu tehnici avansate de explorare parametrică (Siemens HEEDS MDO), cu o optimizare suplimentară a acestei metode noi de generare a datelor sintetice prin intermediul unei relaţii (4.6) de calcul ce stabileşte lungimea minimă necesară a aşchiei dizlocate simulate;
- Expunerea relaţiilor de interdependenţă a parametrilor regimului aşchietor cu influenţă directă asupra distribuţiei vibraţiilor în spectrul frecvenţei (Siemens HEEDS MDO);
- Propunerea unei noi metode de monitorizare a gradului de uzare a sculei aşchietoare folosind semnăturile dinamice simulate ale sistemului în context AI (Siemens HEEDS MDO);
- Reproducerea modelului de cuţit strung SVJBL 2020K 16 folosind soluţia CAD Siemens NX, convertirea lui în machetă numerică în scopul realizării unei analize modale complexe, combinând soluţia software de analiză cu element finit Siemens SimCenter 3D cu soluţia Siemens HEEDS MDO de explorare parametrică;
- Construirea modelului numeric parametric reprezentativ pentru sistemul generator la strunjirea longitudinală. Realizarea unei analize modale complexe folosind aceeaşi suită de soluţii software cu prezentarea principalilor parametri cu potenţial ridicat de influenţă asupra comportamentelor dinamice;
- Proiectarea şi realizarea a două dispozitive speciale utilizate pentru măsurarea inertanţelor punctului generator la operaţia de strunjire longitudinală pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42;
- Elaborarea unei soluţii complexe de optimizare a dispozitivelor folosind o structură unică, compusă din analize cu elemente finite, bazate pe soluţia Siemens SimCenter 3D, în combinaţie cu soluţia de explorare parametrică Siemens HEEDS MDO şi euristici speciale.
- Dezvoltarea elementelor hardware şi software utilizate pentru cuantificarea nivelului de preîncărcare a dispozitivelor proiectate folosind mărci tensometrice BF350 – 3AA, module specializate de convertire ADC HX711 şi placa de dezvoltare Arduino Uno R3;
- Elaborarea şi execuţia procedurilor de etalonare a dispozitivelor dezvoltate în scopul măsurării inertanţelor punctului generator, considerând şi forţele de încărcare quasistatice generate de procesul de aşchiere;
- Cartografierea inertanţelor sculei aşchietoare SVJBL 2020K 16 pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42 folosind accelerometre PCB 333B30 împreună cu ciocanul modal PCB 086C03, sistemul de achiziţie Siemens SCADAS XS şi soluţia software de post-procesare Siemens TestLab;

- Analiza și corelarea rezultatelor obținute la măsurarea inertanțelor sculei așchietoare SVJBL 2020K 16 cu prezentarea principalilor parametri de influență și a gradului de corelare;
- Măsurarea inertanțelor punctului generator ale sistemului generator montat pe strungul CNC PO PY GIM PLG-42 folosind prototipurile special dezvoltate. Interpretarea rezultatelor cu prezentarea gradului de corelare a rezultatelor cu cele simulate și a parametrilor cu influență asupra comportamentului dinamic. S-au folosit aceleași sisteme senzoriale și de achiziție;
- Cuplarea spectrelor de inertanțe cu sursa generatoare de energie în scopul obținerii accelerațiilor finale, presupus măsurabile în cazul unei aplicații reale. Compararea rezultatelor obținute prin simulare cu cele obținute hibrid, prin combinarea inertanțelor măsurate cu spectrul forțelor de așchiere simulate;
- Realizarea programului/modulului de generare de rețele neuronale în scopul testării ipotezelor de implementare propuse;
- Testarea intensivă a diferitelor configurații de rețele neuronale și a parametrilor de antrenare cu arătarea gradului de precizie în funcție de costul computațional și a complexității de variație a comportamentului modal monitorizat.

5.3 Direcții viitoare de cercetare

Subiectul abordat în prezenta teză de doctorat este unul foarte complex. Elementele inovative propuse și rezultatele obținute reprezintă o contribuție în ceea ce privește aplicarea tehnologiilor cu inteligență artificială la monitorizarea și controlul proceselor de fabricație. Pe baza conceptelor explorate și a rezultatelor obținute se pot formula câteva direcții viitoare de dezvoltare precum:

- Optimizarea parametrului *loc* – lungime totală a așchiei dislocate în simulare folosind euristici bazate pe unghiul planului de forfecare, determinat analitic;
- Determinarea funcțiilor de transfer la MU în punctele de prindere ale sculei și ale semifabricatului în scopul înlocuirii condițiilor la limită perfect rigide aplicate în analizele cu elemente finite utilizate. Confirmarea corelărilor îmbunătățite;
- Realizarea unei soluții software generice pentru etalonarea dispozitivelor de pretensionare utilizate la măsurarea inertanțelor punctului generator;
- Extinderea spațiului parametric utilizat pentru validarea performanțelor de predicție ale rețelelor neuronale prin adăugarea parametrilor regimului de așchiere;
- Explorarea/testarea altor tipuri/structuri de rețele neuronale cu alți parametri constructivi și de control ai procesului de antrenare.

5.4 Valorificarea tezei

Rezultatele cercetărilor realizate în contextul prezentei lucrări au fost valorificate în timp prin:

- ✓ publicarea a 4 lucrări științifice la reviste/conferințe internaționale, 3 ca prim autor și 1 în colaborare. Două lucrări sunt indexate Web of Science, trei în Scopus.
- ✓ prin punerea la dispoziție a codurilor sursă, a bazelor de date obținute și a prototipurilor de măsurare pentru a fi testate și/sau extinse în scopul dezvoltării altor platforme similare.

BIBLIOGRAFIE (extras)

- [27] C. Yue, H. Gao, X. Liu, S. Y. Liang și L. Wang, „A review of chatter vibration research in milling,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, nr. 2, pp. 215-242, 2019.
- [28] A. Wang, W. Jin, W. Chen, R. Feng și C. Xu, „Bifurcation and chaotic vibration of frictional chatter in turning process,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, nr. 4, 2018.
- [29] X. J. Zhang, C. H. Xiong, Y. Ding, M. J. Feng și Y. L. Xiong, „Milling stability analysis with simultaneously considering the structural mode coupling effect and regenerative effect,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 53, nr. 1, pp. 127-140, 2012.
- [88] B. B. Muhammad, M. Wan, J. Feng și W. H. Zhang, „Dynamic damping of machining vibration: a review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, pp. 2935-2952, 2017.
- [89] E. Kuljanic, G. Totis și M. Sortino, „Development of an intelligent multisensor chatter detection system in milling,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, nr. 5, pp. 1704-1718, 2009.
- [90] G. Quintana și J. Ciurana, „Chatter in machining processes: A review,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, nr. 5, pp. 363-376, 2011.
- [96] C. A. K. A. Kounta, L. Arnaud, B. Kamsu-Foguem și F. Tangara, „Review of AI-based methods for chatter detection in machining based on bibliometric analysis,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 122, pp. 2161-2186, 2022.
- [37] **A. I. Berariu, I. M. Prodan, C. I. Nită și T. I. Deaconescu, „ANN Samples Generation Using 2D Dynamic FEM for Predicting Machining Vibrations,” *Acoustics and Vibration of Mechanical Structures—AVMS 2019*, vol. 251, pp. 383-393, 2020.**
- [41] **A. I. Berariu, I. M. Prodan, C. I. Nită, S. S. Gorobievschi și T. I. Deaconescu, „Cutting dynamics sample generator for artificial neural networks based on design space exploration and explicit simulation synergy,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, nr. 5, pp. 4189-4195, 2021.**
- [102] Wikipedia, „Kriging,” 21 10 2022. [Interactiv]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kriging>. [Accesat 20 01 2023].