

Universitatea Politehnica din Bucuresti
Facultatea de Automatica si Calculatoare

**Sistem autonom, auto instruibil de comanda adaptiva robot -
CNC integrat in arhitectura orientata pe servicii pentru
reproducerea obiectelor din imagini tip harta de profunzime**

Sinteza Tehnica Etapa IV (2009 - Finala)

**Stabilirea strategiilor de control adaptiv in vederea
optimizarii prelucrarii**

1. Elaborarea modelelor matematice complete ale proceselor de aşchiere pe masini de frezat. Stabilirea seturilor complete de restricții asociate regimurilor de aşchiere, tipurilor de scule și tehnologiilor de prelucrare.

Procesul de aşchiere determină evoluția în timp a eforturilor de aşchiere, pe baza mărimilor de intrare: viteza de avans, w , turația axului principal, n , adâncimea de tăiere, t . El are ca suport fizic interacțiunea permanentă între scula aşchietoare și piesa de prelucrat. În cadrul comportării dinamice a acestui proces se evidențiază în afara setului de mărimi de intrare (controlabile), și a setului de mărimi de ieșire (mărimi mecanice, ce exprimă efortul de aşchiere) o serie de variabile de stare (lățimea de aşchiere, felul aşchierii, tipul sculei aşchietoare, durabilitatea sculei, variația adausului de prelucrare etc.), care, împreună cu seturile de intrare-ieșire determină performanțele dinamice ale procesului.

Stabilirea dependenței între cele trei seturi de mărimi ce permite evidențierea unui model matematic al procesului de aşchiere, va conduce, așa cum se va vedea, la o configurație neliniară, care depinde în primul rând de natura mașinii-unelte și de tipul aşchierii (frezare, strunjire, alezare etc.).

1.1 Descrierea modelului matematic al procesului de frezare.

Mișcarea principală la frezare prin care se realizează aşchiera o constituie rotația frezei. Mișcarea auxiliară la frezare o constituie avansul pe axa X (sau Y) a mesei. Aşchiera are loc prin acțiunea simultană a mișcării principale – rotația frezei – și mișcarea auxiliară – deplasarea piesei.

În funcție de poziția axului principal (al frezei), sunt două tipuri de procese de frezare: verticale și orizontale, iar după felul în care este atacat materialul, se deosebesc două tipuri de frezare: cu freza cilindrică și cu freza frontală.

În ambele cazuri dinții frezei nu sunt solicitați uniform în timpul detașării aşchii.

După sensul mișcării de avans față de sensul de rotație al frezei se deosebesc:

- Frezarea în sensul avansului (fig.1 a);
- Frezarea contra avansului (fig.1 b).

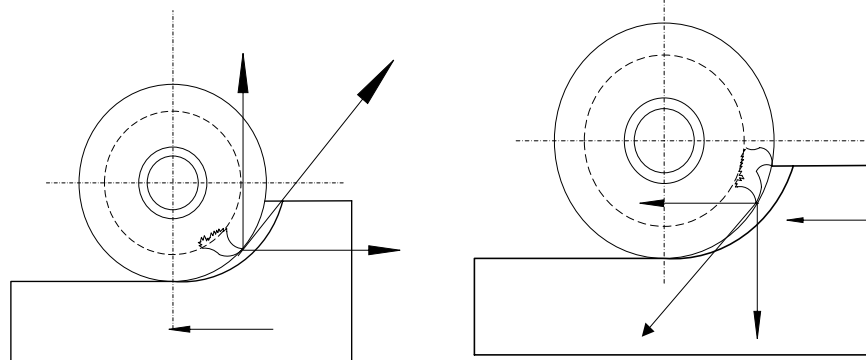


Figura 1 – Tipurile de frezare

Frezarea contra avansului este cea mai răspândită, pentru că are un avantaj major și anume nu lasă urme de prelucrare. Dintele frezei este solicitat pe măsură ce

pătrunde în material, pe suprafața prelucrată de dinte anterior (premergător), mărirându-se astfel frecarea dintre material și freză generând totodată și o însemnată cantitate de căldură. Pentru a reduce această frecare se folosesc diferite uleiuri speciale de ungere și răcire.

În cazul frezei cu freză frontală se pun în evidență următoarele forțe:

- Forța tangențială (F_t);
- Forța radială (F_r);
- Forța axială (F_{ax}) la frezele cu dinții elicoidali; direcția ei depinde de direcția elicei dinților frezei, avînd unghiul de înclinare ω .

Rezultanta (R) dintre forța tangențială F_t și forța radială F_r poate fi descompusă într-un sistem rectangular de două axe în forțele orizontală (F_o) și verticală (F_v).

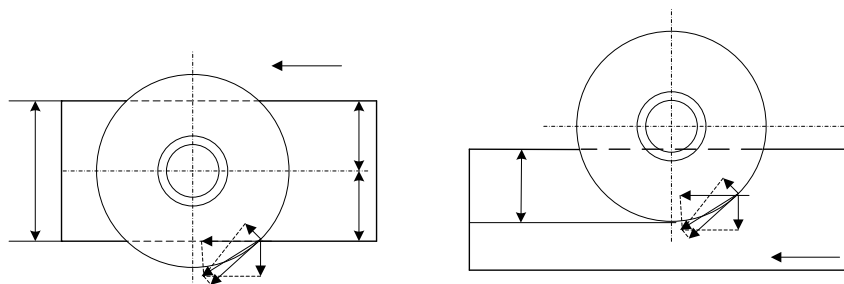


Figura 2. – Frezare frontală simetrică și nesimetrică

În figura 2 sunt reprezentate cele două moduri de frezare frontală simetrică și nesimetrică și forțele solicitante ale frezei, unde cu t – s-a notat lățimea de așchiere, iar cu w_s – viteza de avans.

- La frezarea frontală simetrică:

$$F_o = (0,3 - 0,4) \cdot F_t, \quad F_v = (0,85 - 0,4) \cdot F_t, \quad F_{ax} = (0,5 - 0,55) \cdot F_t.$$

- La frezarea frontală nesimetrică în contra avans:

$$F_o = (0,6 - 0,9) \cdot F_t, \quad F_v = (0,45 - 0,70) \cdot F_t, \quad F_{ax} = (0,5 - 0,55) \cdot F_t.$$

- La frezarea frontală nesimetrică în sensul avansului:

$$F_o = (0,15 - 0,30) \cdot F_t, \quad F_v = (0,9 - 1,0) \cdot F_t, \quad F_{ax} = (0,5 - 0,55) \cdot F_t.$$

Forța tangențială maximă poate fi determinată în funcție de felul frezării (simetric sau nesimetric), funcție de tipul dinților (drepti sau elicoidali), de numărul de dinți, de unghiul de atac etc.

Forțele care apar în timpul frezării, prin mișcarea relativă dintre sculă și piesă, acționează în lanțul cinematic și dinamic al mașinii. Astfel, forța tangențială F_t solicită la încovoiere și torsiune axul pe care se află montată freza.

Mărimea solicitării la torsiune se determină cu ajutorul relației:

$$M_t = F_t \cdot D/2 \cdot 10^{-3};$$

unde M_t este cuplul de torsiune la arborele principal [kgfm], D – diametrul frezei [mm], F_t – forța tangențială [kgf].

Mărimea solicitării la încovoiere este dată de valoarea momentului încovoiător M_i . Valoarea maximă a acestuia apare în lagărul de jos (freză verticală), respectiv lagărul cel mai apropiat de sculă și are valoarea:

$$M_{i \max} = R \cdot b + F_{ax} \cdot a;$$

unde $M_{i \max}$ – momentul încovoiător maxim [kgf cm], R – rezultanta forței tangențiale și axiale de așchiere [kgf], F_{ax} – componenta axială a forței de așchiere [kgf], a – distanța dintre punctul de aplicație al forței și axul principal [cm], b –

distanța de la muchiile așchietoare ale frezei la mijlocul lagărului de jos al arborelui [cm].

Se mai poate arăta că relația poate fi pusă și sub forma:

$$M_{i \max} = (\rho_1 \cdot b + \rho_2 \cdot a) \cdot F_t$$

Diverse rezultate experimentale au demonstrat de-a lungul timpului că forța tangențială poate fi descrisă de relația:

$$F_t = C_p \cdot z \cdot B^{up} \cdot w_{sd}^{yp} \cdot D^{-qp} \cdot t^{xp}$$

unde: C_p – constantă de material, z – numărul de dinți ai frezei, B – lățimea de așchiere [mm], w_{sd} – avansul pe dinte [mm/rot.dinte], t - adâncimea de așchiere [mm], x_p, u_p, y_p, q_p – exponenți.

Ținând cont că :

$$w_{sd} = \frac{w_s}{z \cdot n}$$

w_s – viteza de avans [mm/min]

n – turația frezei [rot/min]

rezultă pentru forța de așchiere tangențială F_t expresia:

$$F_t = C_p \cdot z^{1-yp} \cdot B^{up} \cdot D^{-qp} \cdot t^{xp} \cdot w_s^{yp} \cdot n^{-yp}$$

Expresia cuplului de torsiune, ținând cont de expresia forței tangențiale, devine:

$$M_t = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot C_p \cdot z^{1-yp} \cdot D^{1-qp} \cdot B^{up} \cdot t^{xp} \cdot w_s^{yp} \cdot n^{-yp}$$

de unde se poate evidenția o constantă și anume:

$$\Gamma_1 = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot C_p \cdot z^{1-yp} \cdot D^{1-qp}$$

obținându-se în final:

$$M_t = \Gamma_1 \cdot B^{up} \cdot t^{xp} \cdot w_s^{yp} \cdot n^{-yp}$$

În mod analog, înlocuind cu:

$$\Gamma_2 = (\rho_1 \cdot b + \rho_2 \cdot a) \cdot C_p \cdot z^{1-yp} \cdot D^{-qp}$$

momentul de încovoiere maximă devine:

$$M_{i \max} = \Gamma_2 \cdot B^{up} \cdot t^{xp} \cdot w_s^{yp} \cdot n^{-yp}$$

Se poate observa că valorile cuplului de torsiune și ale momentului de încovoiere maxim diferă printr-o constantă:

$$\xi = \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2}$$

de unde se deduce:

$$M_t(i,j) = \xi(i,j) \cdot M_{i \max}(i,j)$$

unde i definește scula folosită iar j materialul de prelucrat.

Alegerea regimului de lucru, adică a lui n (turația motorului acționării principale) și a vitezei de avans a mesei se face în raport cu tipul prelucrării, în funcție de scula folosită (material, număr de dinți, diametru). Rezultatul este viteza de rotație v [rot/min] iar turația frezei rezultă din:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}$$

În funcție de felul prelucrării (degroșare, finisare) se alege un avans pe dinte w_{sd} adecvat, rezultând avansul w_s din relația:

$$w_s = w_{sd} \cdot z \cdot n$$

n fiind calculat cu relația anterioară.

1.2 Setul complet de restricții asociat

Pentru procesul de frezare va fi considerat un model matematic neliniar, descris în principal de ecuațiile de încărcări date de relațiile anterioare cu restricțiile tehnologice (referitoare la regimurile de lucru admise) și constructive (caracteristicile mașinii și ale sculei folosite) următoare:

- a) $w_s \min \leq w_s \leq w_s \max$
- b) $n_{\min} \leq n_s \leq n_{\max}$
- c) $t \leq t_{\max}$
- d) $P_{\max} \geq C_1 \cdot w_s^{yp} \cdot n^{1-yp} \cdot t^{xp}$, restricția de putere la motorul principal
- e) $M_{t \max} \geq C_2 \cdot w_s^{yp} \cdot n^{-yp} \cdot t^{xp}$
- f) $M_{f \max} \geq C_3 \cdot w_s^{yp} \cdot n^{-yp} \cdot t^{xp}$
- g) $w_{sd \min} \leq w_{sd} \leq w_{sd \max}$

Folosindu-ne de aceste relații se poate reprezenta în funcție de mărimile de comandă: w_s, n, t domeniul de lucru admisibil în cazul procesului de frezare, pentru o adâncime t dată ca în figura 3.

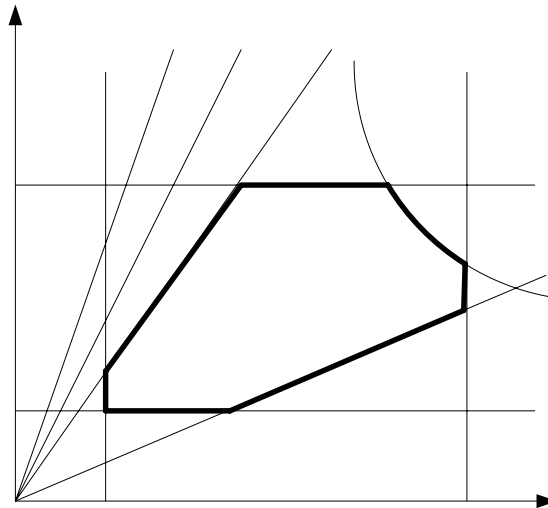


Figura 3 - Domeniul de lucru admisibil.

2. Studiul tehnicilor de adaptare a regimurilor de aschiere pe masini de frezat. Caracterizarea gradului de incarcare a masinilor unelte si definirea strategiilor de adaptare cu restrictii (ACC)

2.1 Tehnici de adaptare a regimurilor de aschiere. Arhitectura propusa

Se pot gasi două soluții pentru îmbunătățirea calității așchierii pe mașini unelte. Prima dintre ele este cea în care se calculează pe baza unui model matematic acceptat, în faza de programare, cu ajutorul calculatorului, a tuturor parametrilor de așchiere. Marele dezavantaj al acestora este necesitatea unor informații cât mai complete asupra procesului, piesei, sculei și mașinii. În acest mod criteriile de performanță sunt

prestabilite dar procedeul de aşchiere este suboptimal deoarece nu se poate ține cont de neliniaritatea/neomogenitatea parametrilor modelului aproximat.

Cea de a doua metodă presupune caracterizarea gradului de încărcare a mașinii unealtă după efortul dezvoltat în cel mai solicitat loc al ei și reglarea parametrilor procesului în scopul menținerii invariante a efortului la o limită considerată eficientă. În acest caz se stabilesc regimurile la limită la care mașina unealtă e supusă unei solicitări mecanice, electrice, termice, etc. maxim admisibile și se caracterizează printr-un parametru – forța de aşchiere, curentul motorului acționării principale, etc. care printr-o buclă de adaptare este menținut invariant modificând pentru aceasta unul din parametrii procesului: avansul, turația sau adâncimea.

Modificarea avansului este limitată la toate tipurile de prelucrări datorită condițiilor impuse privind rugozitatea suprafețelor prelucrate. O limitare a avansului este dată și de limitările fizice ale instalației ce furnizează această mărime.

Modificarea adâncimii de aşchiere este funcție de adaosul de prelucrare, variația ei fiind posibilă doar în sensul descreșterii.

Turația ar putea fi modificată la rândul ei dacă motorul respectiv de acționare permite variația continuă a turației, aceasta încadrându-se între limite minim-maxim.

Soluția adoptată a fost cea de modificare a avansului și a turației arborelui motor în funcție de limitările impuse, deoarece, modificarea adâncimii de aşchiere ar presupune o trecere ulterioară prin același punct pentru a aduce piesa la nivelul programat.

- **Arhitectura hardware**

Structura hardware a sistemului de control adaptiv conține următoarele componente:

- PC
- Microcontroller pe 8 biți - ATmega64
- Senzor de curent: CUIINC SCD05PUR, domeniul de măsură $\pm 5A$, izolat galvanic
- Senzor torsiune: INTERFACE TS19 - punte Wheatstone, domeniul de măsură 0-100 Nm, ieșire 0-15 mV la alimentare cu 10V
- Amplificator semnal (circuit specializat pentru instrumentație): Burr-Brown INA125P (factor amplificare 100)
- Senzor de turație pentru arborele principal: encoder incremental de tip cuadratura, CUIINIC MAG30
- Potențiomtru digital Microchip MCP41050
- Circuite de putere pentru comanda motoarelor (din controller-ul CNC existent)

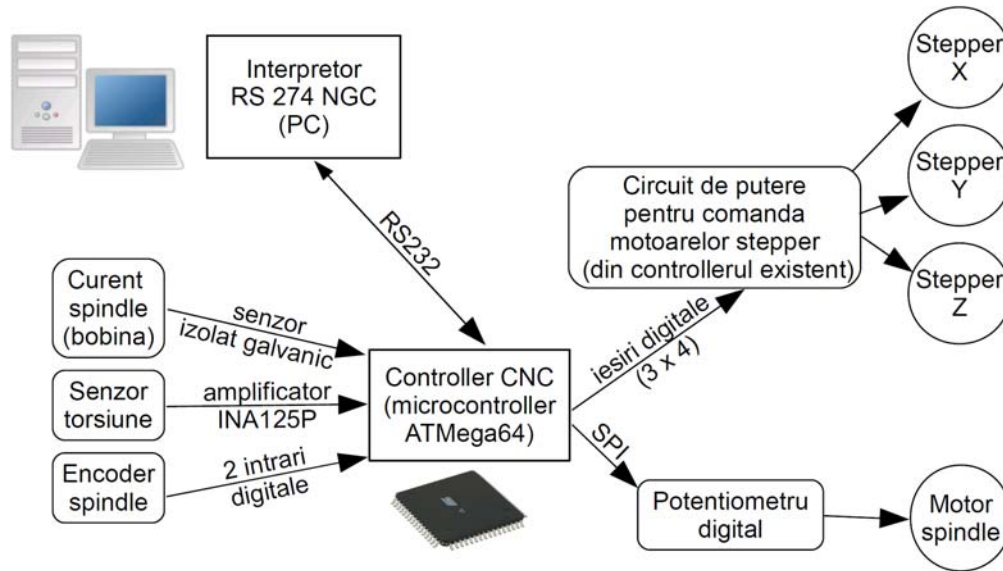


Figura 4. – Arhitectura hardware a sistemului de comandă adaptiv pentru EMCO F1 CNC

- **Arhitectura software**

Diagrama software a sistemului este prezentată în Fig. 5. Componentele software pot fi împărțite în două categorii:

- Software care rulează pe PC
 - o Interfața cu utilizatorul
 - o Interpretorul G-Code RS274/NGC
- Software care rulează pe microcontroller
 - o Interpretorul de comenzi canonice (interfața cu interpretorul G-Code)
 - o Algoritmul de conducere adaptivă ACC
 - o Modulul pentru generarea impulsurilor necesare motoarelor pas cu pas pentru cele 3 axe (X, Y și Z)
 - o Bucla de reglare a turației arborelui principal

Interfața cu utilizatorul (front-end) rulează pe PC. Tot pe PC rulează un modul software responsabil pentru interpretarea programelor în limbaj RS274 (DIN 66025). Interpretorul folosit este *open source*, se numește RS274/NGC (New Generation Controller) și a fost dezvoltat de NIST [1]. Programul este conceput pentru a putea rula în două moduri:

- Stand-Alone Interpreter (interpreteor de sine statator)
- Integrated with EMC (Enhanced Machine Controller)

Interpreteorul RS274/NGC în modul Stand-Alone rulează folosind o interfață de tip consolă, primind ca intrare un fișier text (ASCII) reprezentând programul G-Code. Programul mașină este interpretat și transformat într-o serie de apeluri de *funcții canonice de prelucrare* (Canonical Machining Functions). Aceste funcții reprezintă interfața dintre interpreteor și mașina fizică și sunt implementate de utilizatorul programului RS274/NGC conform specificațiilor din documentația tehnică [1].

Subsetul de funcții canonice implementate este următorul:

- STRAIGHT_TRAVERSE: pentru deplasări în gol, cu viteza maximă
- STRAIGHT_FEED: pentru mișcare liniară cu viteză de avans programată
- ARC_FEED: pentru mișcări circulare
- DWELL: pauză în operația de așchiere
- SET_FEED_RATE: stabilirea vitezei de avans de referință
- SET_SPINDLE_SPEED: stabilirea turației de referință pentru arborele principal
- START_SPINDLE_CLOCKWISE: pornire arbore principal (spindle)
- STOP_SPINDLE_TURNING: oprire spindle
- ENABLE_FEED_OVERRIDE: activeaza controlul adaptiv al avansului
- ENABLE_SPEED_OVERRIDE: activeaza controlul adaptiv al arborelui principal
- DISBLE_FEED_OVERRIDE și
- DISABLE_SPEED_OVERRIDE: dezactivează controlul adaptiv (mașina rulează în mod clasic, cu valorile FEED/SPEED specificate în program)

Funcțiile canonice pentru care se aplică algoritmul de conducere adaptivă ACC sunt STRAIGHT_FEED și ARC_FEED, deoarece ele realizează procesul efectiv de frezare. Strategia de conducere în cele două cazuri este practic identică, singura diferență intervenind la generarea traiectoriei. Putem privi funcția STRAIGHT_FEED ca un caz particular al ARC_FEED, considerând că o deplasare în linie dreaptă este echivalentă cu o deplasare pe un arc de cerc cu raza infinită.

Conducerea mașinii se realizează pe două niveluri:

- Nivelul superior: conducere adaptivă ACC
- Nivelul inferior:
 - o Reglarea turației arborelui principal, folosind o buclă de tip PI (reglare după eroare)
 - o Generarea impulsurilor pentru comanda motoarelor pas cu pas X/Y/Z, în buclă deschisă

• **Reglarea turației**

Acest modul este prezentat în Fig. 5, dreapta jos, și conține următoarele elemente:

- Rutina de citire a encoderului cuadratura: se bazează pe un mecanism de tip polling (timer) și verifică periodic starea celor două intrări digitale (A și B), care oferă informații despre poziția motorului sub formă incrementală, în cod Gray. Poziția unghiulară a motorului poate fi obținută prin acumularea impulsurilor primite de la encoder.
- Rutina de calcul a vitezei se bazează pe derivarea poziției obținute de la encoder și aplicarea unui filtru de netezire de tip medie alunecătoare (MA)
- Regulatorul de turație este de tip PI și primește ca referință turația calculată în mod adaptiv, conform algoritmului ACC. Rutina de reglare este apelată de un timer prin mecanismul de întreruperi.

- **Comanda motoarelor pas cu pas**

Sistemul de deplasare al mașinii permite poziționarea sculei cu o rezoluție de 0.01 mm. Astfel, la un moment dat, coordonatele X, Y, Z ale sculei sunt numere întregi. Pentru a realiza o deplasare pe mai multe axe simultan, este necesară *discretizarea* traiectoriei, astfel încât aceasta să fie descrisă de o secvență de coordonate discrete. Fiecare axă va fi incrementată cu cel mult o unitate la fiecare pas.

Pentru această operație a fost ales algoritmul Bresenham [2], unul din cei mai vechi algoritmi utilizați în grafica pe calculator, proiectat inițial pentru a desena linii pe ecran. Este considerat și astăzi unul din cei mai eficienți algoritmi pentru discretizarea liniilor și a cercurilor [3]. Deoarece algoritmul lucrează doar cu numere întregi și necesită doar operații de adunare, scădere și deplasare pe biți, resursele de calcul necesare sunt reduse, putând fi folosit cu succes pe microcontroller-ul pe 8 biți fără ca acest lucru să introducă timp de așteptare. Algoritmul poate discretiza atât linii 2D sau 3D în plan (variante originală) cât și arce de cerc (variante extinsă).

Având traiectoria discretizată, aceasta poate fi trimisă la motoarele pas cu pas sub forma unor impulsuri de comandă de tip ciclic, cu perioada de 4 sau 8 unități de timp. Transmiterea impulsurilor este dictată de un timer a cărui frecvență se calculează în funcție de viteza de avans specificată și de accelerația maximă dorită. Profilul de accelerație folosit conține următoarele etape:

- accelerație constantă
- croazieră (deplasare cu viteză liniară constantă)
- decelerație constantă

Se pot obține mișcări mai line în cazul folosirii unui profil cu accelerație variabilă (de exemplu, forma unei de accelerație trapezoidală). Deoarece mașina EMCO F1 este proiectată să lucreze la viteze de avans reduse (maxim 400 mm/min), avantajul utilizării unui profil de accelerație complex este nesemnificativ.

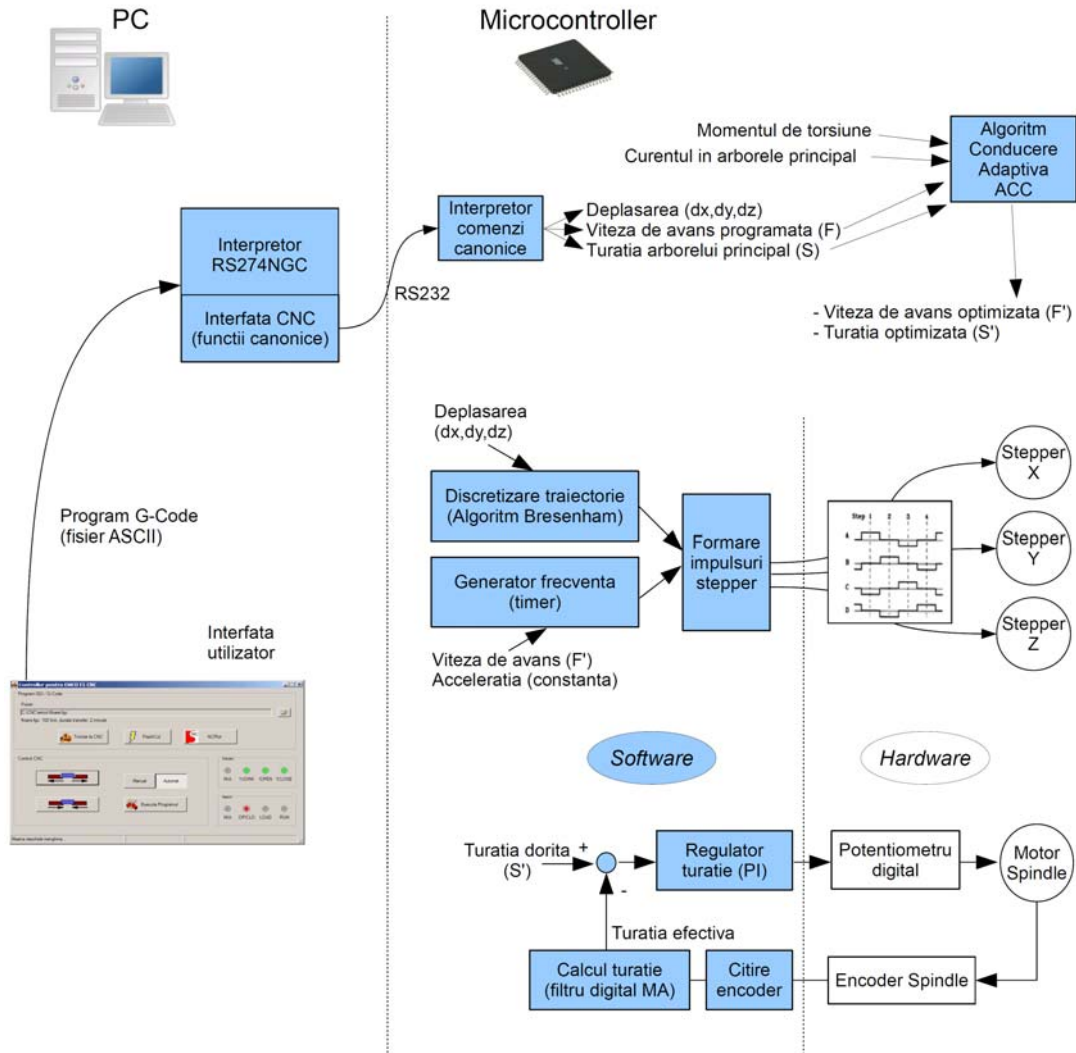


Figura 5 - Arhitectura software a sistemului de comandă adaptiv pentru EMCO F1 CNC

2.2 Definirea strategiilor de adaptare cu restricții (ACC)

Algoritm de conducere adaptivă ACC

În practică s-a dovedit că adoptarea unui criteriu de adaptare determinat de încărcarea maximă controlată a mașinii unelte poate spori productivitatea și de aceea acesta a fost adoptat și în controller-ul prezentat mai sus.

Acest criteriu se concretizează prin menținerea momentului de torsiune la o valoare maximă, stabilită din considerații tehnologice:

$$M_t = \max$$

Drept mărimi de comandă, se consideră viteza de avans a mesei (w) și turația motorului (n).

Problema de adaptare specificată va lua în considerație restricțiile tehnologice și cinematice, rezultând un domeniu admisibil de operare, în care trebuie menținut în permanență punctul de funcționare.

Se vor considera următoarele restricții:

- 1) $M_t \in [M_{t1}, M_{t2}]$ unde M_{t1}, M_{t2} , sunt valoarea superioară respectiv inferioară a momentului de torsiune la arborele principal, intervalul dintre ele fiind stabilit din considerente a sistemului automat, pentru că un criteriu de tip $M_t = \text{const}$ ar produce oscilații.
- 2) $w_{\text{inf}} \leq w \leq w_{\text{sup}}$ unde $w_{\text{inf}}, w_{\text{sup}}$ reprezintă gama admisibilă de modificare a vitezei de avans în lanțul cinematic longitudinal (transversal);
- 3) $I_{\text{inf}} \leq I \leq I_{\text{sup}}$ limita inferioară respectiv superioară impusă pentru sesizarea operației de așchiere și pentru protejarea motorului principal de rotește freza.
- 4) $n_{\text{min}} \leq n \leq n_{\text{max}}$ – turația motorului principal trebuie să rămână între limitele inferioară respectiv superioară admisibile.

Algoritmul de conducere adaptativă funcționează conform diagramei din figura 6. El începe prelucrarea după realizarea poziționării frezei la cota inițială. Prelucrarea începe cu valori programate pentru viteza de avans și pentru turația sculei precum și cu o valoarea prescrisă (constantă pe durata prelucrării) pentru adâncimea de așchiere. În funcție de informația primită în timpul procesării, viteza de avans este modificată astfel încât să fie respectate restricțiile, iar momentul de torsiune să fie adus la valoarea maximă. În cazul depășirii restricțiilor, viteza de avans este scăzută pentru readucerea punctului de lucru în domeniul admisibil, iar în cazul în care punctul de funcționare este în domeniul admisibil se crește viteza de avans pentru realizarea criteriului de adaptare impus. Dacă viteza de avans a ajuns la limita inferioară (w_{min}), iar restricțiile sunt încă depășite, este crescută viteza de rotație a arborelui principal cu o cantă prescrisă. Dacă nici în acest mod nu se revine în domeniul admisibil, atunci se oprește procesul dându-se un semnal de eroare către operator. Pentru realizarea efectivă a criteriului de adaptare, momentul de torsiune este menținut în plaja:

$$M_{t2} \leq M \leq M_{t1} = M_{\text{max admisibil}}$$

Strategia se bazează pe o listare completă a situațiilor concrete în care se poate afla punctul de funcționare în planul (w, n) la un moment de timp dat. Listarea este generată de preluarea în paralel a semnalelor date de senzorii prezențați anterior.

Tabelul 1. Comenzi algoritmul de conducere adaptiva AAC

Mt	I	w	n	Comanda
>Mt max	<I max	<w min	<n max	Creste n
<Mt min	<I max	<w max	X	Creste w
>Mt max	>I max	<w min	X	Eroare Stop
>Mt max	<I max	<w min	>n max	
<Mt max, >Mt min	>I max	<w min	<n min	
<Mt min	<I max	>w max	$\leq n$ min	Mentinere regim tehnologic
<Mt max, >Mt min	<I max	>w min, <w max	>n min, <n max	
<Mt max, >Mt min	>I max	X	>n min	Scade n
<Mt min	>I max	X	>n min	
<Mt min	<I max	>w max	>n min	
<Mt max, >Mt min	>I max	>w min	<n min	Scade w
>Mt max	X	>w min	X	

În tabelul 1 sunt figurate comenzile date de algoritmul de conducere în toate stările de funcționare.

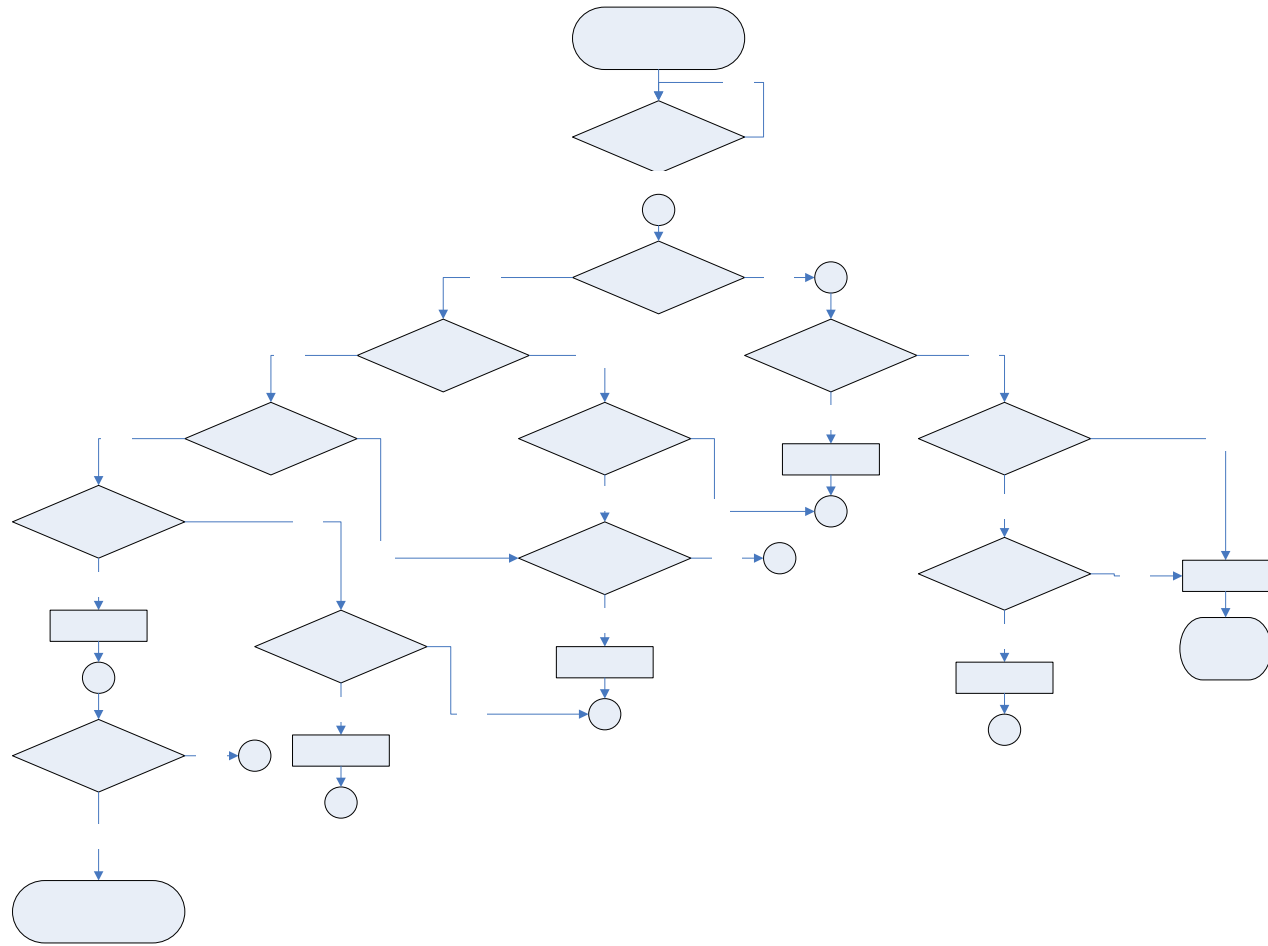


Figura 6 – Algoritmul de conducere adaptativă ACC

- [1] Thomas R. Kramer, Frederick M. Proctor. Elena Messina (2000). The NIST RS274NGC Interpreter - Version 3, *Raport tehnic NIST (National Institute of Standards and Technology)*, Gaithersburg, Maryland.
- [2] Jack E. Bresenham, "Algorithm for computer control of a digital plotter", *IBM Systems Journal*, Vol. 4, No.1, January 1965, pp. 25–30
- [3] *** (2007). Drawing Line Using Bresenham Algorithm, Tech-Algorithm.com