

7.8. DEFUZZIFICARE

Operatia de asignare a unei valori reale corespunzatoare unei functii de apartenenta se numeste *defuzzificare*, fiind necesara in numeroase aplicatii in care rezultatele sunt fuzzy.

In esenta, defuzzificarea reprezinta procesul de transformare a unei marimi fuzzy intr-o marime crisp. Iesirea unui proces (sistem) fuzzy poate fi - din punct de vedere logic - reuniunea a doua sau mai multe functii de apartenenta fuzzy, definite pe universul de discurs al variabilei de iesire. De exemplu, putem presupune ca iesirea fuzzy a unui sistem este alcatuita din doua parti: prima parte de forma trapezoidala $\tilde{C}_1$ si a doua - de forma triunghiulara $\tilde{C}_2$. Reuniunea acestor doua functii de apartenenta este multimea fuzzy $\tilde{C} = \tilde{C}_1 \cup \tilde{C}_2$. In general, iesirea fuzzy $\tilde{C}$ a unui proces poate implica mai multe functii de apartenenta fuzzy de diferite forme; in acest caz $\tilde{C} =$

$\bigcup_{i=1}^k \tilde{C}_i$. Corespunzator conventiei adoptate exista mai multe metode de defuzzificare, alegerea metodei in aplicatii bazându-se pe criterii care tin de aprecierea rezultatelor obtinute in fiecare aplicatie data.

a) Metoda maximului functiei de apartenenta. Aceasta metoda furnizeaza ca rezultat al defuzzificarii, valoarea crisp u^* , pentru care $\mu_{\tilde{C}}(u^*) \geq \mu_{\tilde{C}}(u)$, $\forall u \in U$ (fig. 7.11). Daca functia de apartenenta isi atinge maximul intr-un singur punct, valoarea *reprezentativa* a functiei de apartenenta se considera ca fiind valoarea variabilei (u^*) pentru care se atinge maximul respectiv.

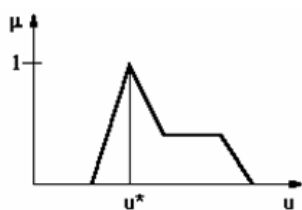


Fig. 7.11

b) Metoda (abscisei) centrului de masa este una dintre cele mai utilizate metode de defuzzificare si permite calculul valorii u^* (fig. 7.12) conform relatiei:

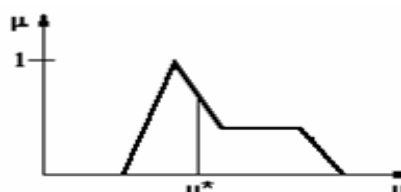


Fig. 7.12

$$u^* = \frac{\int \mu_{\tilde{C}}(u) \cdot u \cdot du}{\int \mu_{\tilde{C}}(u) \cdot du} \quad (7.47)$$

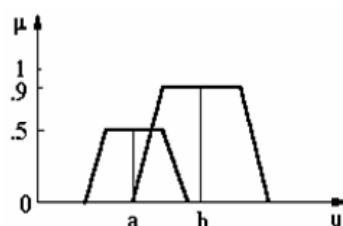


Fig. 7.13

c) Metoda mediei ponderate este aplicabila pentru functii de apartenenta simetrice, fiind prezentata in figura 7.13 din care rezulta ca valoarea defuzzificata se obtine prin ponderarea valorilor functiilor de apartenenta in punctele de maxim:

$$u^* = \frac{a(.5) + b(.9)}{.5 + .9} \quad (7.48)$$

In cazul in care functia de apartenenta isi atinge maximul in mai multe puncte, sau pe unul sau mai multe intervale, se poate aplica metoda punctului mediu sau metoda mediei maximelor prezentata in cele ce urmeaza.

d) Metoda mediei maximelor presupune calculul lui u^* (fig. 7.14) unde:

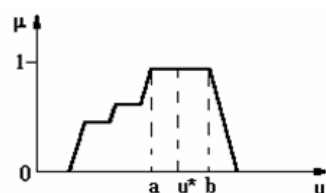


Fig. 7.14

$$u^* = (a + b) / 2 \quad (7.49)$$

7.9. AGREGAREA REGULILOR FUZZY

Majoritatea sistemelor bazate pe reguli contin mai multe reguli. Procesul de obtinere a concluziei globale pornind de la contributia individuala a consecventului fiecarei reguli din baza de reguli se numeste *agregarea regulilor*.

Exemplu: Fie o problema de decizie bazata pe cunostinte imprecise, in care intervin trei multimi fuzzy $\tilde{B}_1$, $\tilde{B}_2$, $\tilde{B}_3$ a caror functii de apartenenta sunt reprezentate in figura 7.15.

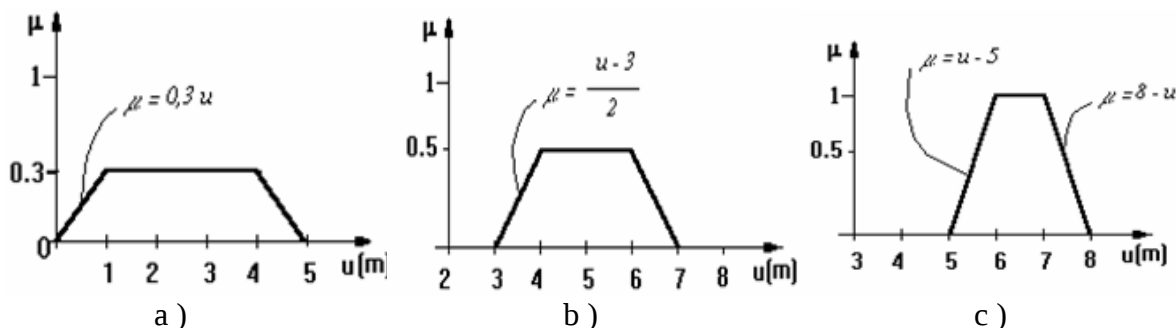


Fig. 7.15 - Functiile de apartenenta pentru $\tilde{B}_1$, $\tilde{B}_2$, $\tilde{B}_3$

Se cere sa se determine in urma agregarii acestor cunostinte valoarea reala a raspunsului. In concordanta cu metoda centrului de masa se poate calcula u^* astfel (fig. 7.16):

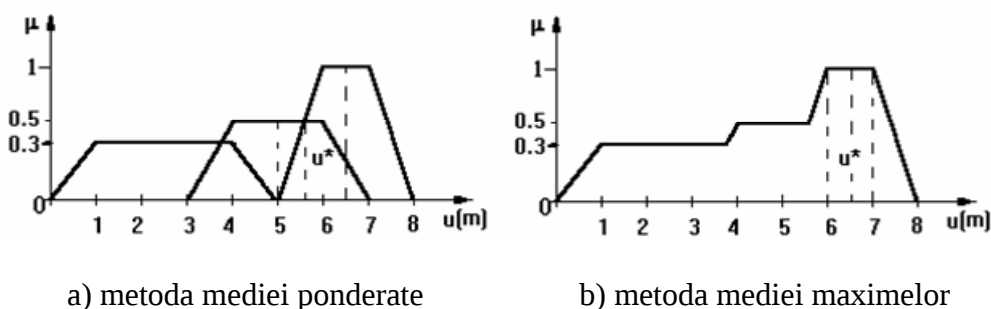
$$u^* = \frac{\int \mu_B(u) \cdot u du}{\int \mu_B(u) \cdot du} = \frac{\int_0^1 (3u) u du + \int_1^{3.6} 3u du + \int_{3.6}^4 \left(\frac{u-3}{2}\right) u du + \int_4^{5.5} (.5) u du + \int_{5.5}^6 (u-5) u du + \int_6^7 u du + \int_7^8 (8-u) u du}{\int_1^0 (3u) du + \int_1^{3.6} (.3) du + \int_{3.6}^4 \left(\frac{u-3}{2}\right) du + \int_4^{5.5} (.5) du + \int_{5.5}^6 (u-5) du + \int_6^7 du + \int_7^8 (8-u) du} = 4.9 \text{ m}$$

Fig. 7.16

In conformitate cu metoda mediei ponderate rezulta (fig. 7.17. a):

$$u^* = \frac{(.3 \times 2.5) + (.5 \times 5) + (1 \times 6.5)}{.3 + .5 + 1} = 5.41 \text{ m},$$

iar in conformitate cu metoda mediei maximelor (fig. 7.17.b) rezulta: $u^* = (6 + 7) / 2 = 6.5 \text{ m}$.



a) metoda mediei ponderate

b) metoda mediei maximelor

Fig. 7.17

7.10. CONVERSIA DINTRE VARIABILELE FUZZY SI CANTITATILE PRECISE

La iesirea sistemului se poate utiliza un instrument pentru masurarea erorii e si calculul variatiei erorii Δe ambele fiind numere crisp. O procedura standard de fuzzificare permite obtinerea functiilor de apartenenta corespunzatoare cantitatilor fuzzy ($\tilde{A}_i$, $\tilde{B}_j$) $\rightarrow$ vezi cap.7.5. Sistemul de control fuzzy primeste la intrare (de la iesirea procesului) fapte de tipul $\tilde{A}$ si $\tilde{B}$ producand la

iesirea sa valoarea fuzzy $\tilde{C}$ (vezi cap.7.5), corespunzatoare marimii de comanda conform tabelului 7.3. Inainte insa de realizarea actiunii de control trebuie de obtinut marimea de control precisa Δe prin conversia lui C in Δu . Acest lucru se obtine printr-o metoda de defuzificare.

Realizarea tabeli de control. Când procedurile anterioare au fost realizate pentru toate valorile corespunzatoare lui e si Δe se obtine tabela de control, care poate arata ca in tabelul 7.4.

Tabelul 7.4

e	Δe												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-5	6	6	6	6	6	6	6	4	4	2	0	0	0
-4	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-3	6	6	6	6	6	6	6	3	2	0	-1	-1	-1
-2	4	4	4	5	4	4	4	1	0	0	-1	-1	-1
-1	4	4	4	5	4	4	1	0	0	0	-3	-2	-1
0-	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
0+	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
1	2	2	2	2	0	0	-1	-4	-4	-3	-4	-4	-4
2	1	1	1	-2	0	-3	-4	-4	-4	-3	-4	-4	-4
3	0	0	0	0	-3	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
4	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7
5	0	0	0	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
6	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7

Acest tabel contine acum cantitati numerice precise utilizate de catre sistemele hardware industriale. In cazul in care valorile din tabelul 7.4 sunt reprezentate intr-un sistem tri-ortogonal avand axele e , Δe si Δu , ele reprezinta *suprafata de control* (de raspuns).

7.11. PROBLEMA “PENDULUL INVERS” [10]

Figura 7.18 prezinta un *pendul invers*, care a constituit un caz de studiu important in teoria controlului fuzzy .

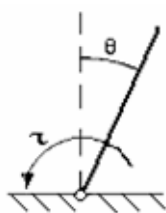


Fig. 7.18

Se doreste proiectarea si analiza unui controler fuzzy pentru sistemul alcatuit dintr-un pendul invers a carei ecuatie diferentiala este data de:

$$J \cdot d^2 \theta / dt^2 = (m \ell g) \sin \theta - \tau ;$$

$$- m \ell^2 \cdot d^2 \theta / dt^2 + (m \ell g) \sin \theta = \tau = u(t) ,$$

in care m = masa pendulului , ℓ = lungimea pendulului , θ = deviatia unghiulara in raport cu axa verticala , in sensul acelor de ceas , $\tau = u(t)$ = cuplul aplicat pendulului (in sens trigonometric), adica actiunea de control.

Sinteza controlerului. Presupunând $x_1 = \theta$ si $x_2 = d\theta/dt$ variabilele de stare, reprezentarea spatiului de stare pentru sistemul neliniar definit prin ecuatie anteriora este data prin:

$$dx_1/dt = x_2 ; \quad dx_2/dt = (g/\ell) \sin x_1 - (1/m \ell^2) u(t) .$$

Se cunoaste ca pentru unghiuri θ mici $\sin \theta \approx \theta$, cu unghiul θ masurat in radiani. Aceasta relatie este folosita pentru liniarizarea ecuatiilor neliniare de stare:

$$dx_1/dt = x_2 ; \quad dx_2/dt = (g/\ell) x_1 - (1/m \ell^2) u(t) .$$

Daca x_1 este masurat in “grade” si x_2 este masurat in “grade pe secunda” prin alegerea lui

$$\ell = g \quad \text{si} \quad m = 180 / (\pi \cdot \ell^2) ,$$

(egalitati numerice) se obtin ecuatiile discrete si liniarizate, care pot fi reprezentate prin ecuatiile cu diferente :

$$dx_1/dt = x_2 ; \quad dx_2/dt = x_1 - u .$$

$$x_1(k+1) = x_1(k) + x_2(k) ; \quad x_2(k+1) = x_1(k) + x_2(k) - u(t) .$$

Pentru aceasta problema se presupune ca universurile de discurs pentru cele doua variabile sunt:

$$-2^{\circ} \leq x_1 \leq 2^{\circ} \quad \text{si} \quad -5 (^{\circ}/s) \leq x_2 \leq 5 (^{\circ}/s).$$

Pasul 1.- Se construiesc functiile de apartenenta pentru marimile de intrare ca multimi fuzzy: x_1 pe universul de discurs $[-2^{\circ}, 2^{\circ}]$ pentru valorile lingvistice *pozitiv (P)*, *zero (Z)* si *negativ (N)* asa cum se arata in figura 7.19a; x_2 cu valorile lingvistice *pozitiv (P)*, *zero (Z)* si *negativ (N)* definite pe universul de discurs $[-5^{\circ}/s, +5^{\circ}/s]$, asa cum se arata in figura 7.19b.

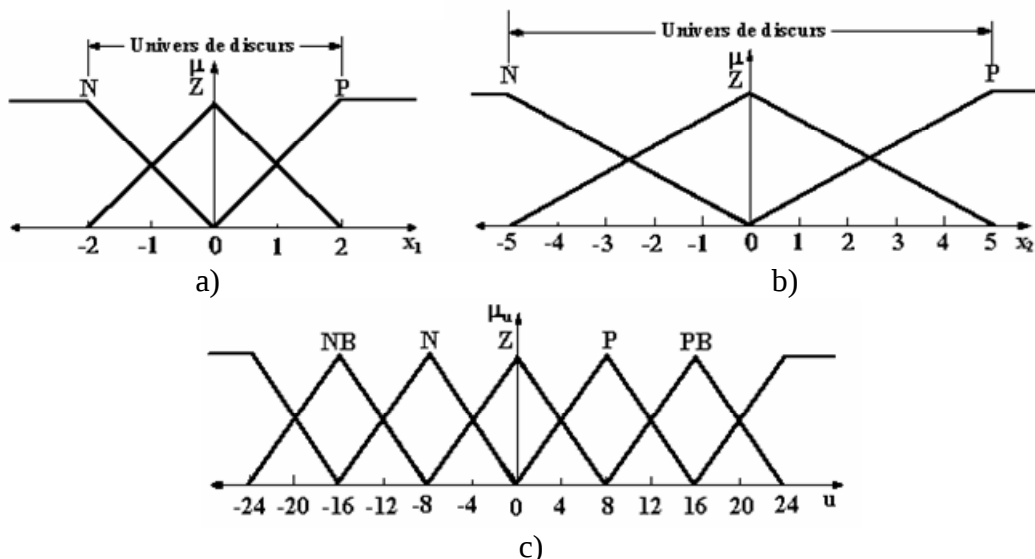


Fig. 7.19

Pasul 2.- Pentru partitionarea spatiului de control (iesire) se vor construi cinci functii de apartenenta aferente lui $u(k)$ pe universul sau de discurs $(-24 \leq u(k) \leq 24 \text{ N.m.rad.})$, asa cum se arata in figura 7.19c. De notat este faptul ca universul de discurs a fost partitionat in sapte valori lingvistice din care vor fi folosite numai cinci (NB, N, Z, P, PB).

x_2	P	Z	N
x_1			
P	PB	P	Z
Z	P	Z	N
N	Z	N	NB

Pasul 3.- Se construiesc noua reguli de control (chiar daca nu se folosesc toate) conform tabelii alaturate.

Pasul 4.- Utilizând regulile reprezentate in tabela, se vor realiza inferentele fuzzy, bazându-ne pe conditiile initiale crisp $x_1(0) = 1^{\circ}$ si $x_2(0) = -4^{\circ}/s$ in patru parti ($0 \leq k \leq 3$).

Fiecare ciclu de simulare se va baza pe functiile de apartenenta aferente variabilelor de intrare si va produce functia de apartenenta corespunzatoare actiunii de control $u(k)$. Se va defuzzifica functia de apartenenta pentru marimea de control folosind metoda centrului de greutate, dupa care se vor folosi ecuatiile cu diferente in vederea obtinerii noilor valori pentru x_1 si x_2 . Fiecare ciclu de simulare, diferit de cel initial, va demara cu noile valori pentru x_1 si x_2 ca si conditii initiale pentru ciclul urmator. In figura 7.20 sunt evidentiata conditiile initiale pentru x_1 si respectiv x_2 . Din tabela de control rezulta:

Daca $(x_1 = P)$ si $(x_2 = Z)$, atunci $(u = P) \Leftrightarrow \min(0.5, 0.2) = 0.2 (P)$;

Daca $(x_1 = P)$ si $(x_2 = N)$, atunci $(u = Z) \Leftrightarrow \min(0.5, 0.8) = 0.5 (Z)$;

Daca $(x_1 = Z)$ si $(x_2 = Z)$, atunci $(u = Z) \Leftrightarrow \min(0.5, 0.2) = 0.2 (Z)$;

Daca $(x_1 = Z)$ si $(x_2 = N)$, atunci $(u = N) \Leftrightarrow \min(0.5, 0.8) = 0.5 (N)$

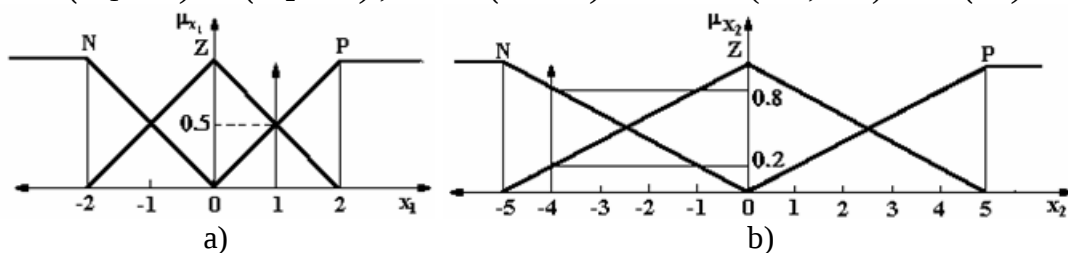


Fig. 7.20

Figura 7.21a evidenziaza reuniunea multimilor fuzzy trunchiate corespunzatoare variabilei de control u , iar in figura 7.21b se reprezinta valoarea de control defuzzificata u^* .

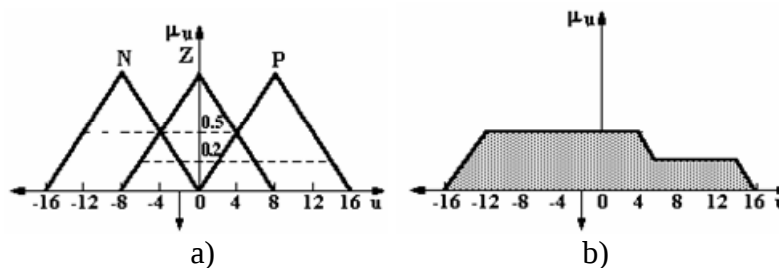


Fig. 7.21

În felul acesta primul ciclu al simulării se încheie. Cu valoarea defuzzificată a variabilei de control ($u = -2$) și folosind ecuațiile:

$$x_1(k+1) = x_1(k) + x_2(k) \quad ; \quad x_2(k+1) = x_1(k) + x_2(k) - u(t),$$

se determină condițiile inițiale pentru iterația următoare (fig. 7.22), și anume:

$$x_1(1) = x_1(0) + x_2(0) = 1 - 4 = -3 \quad ;$$

$$x_2(1) = x_1(0) + x_2(0) - u(0) = 1 - 4 - (-2) = -1.$$

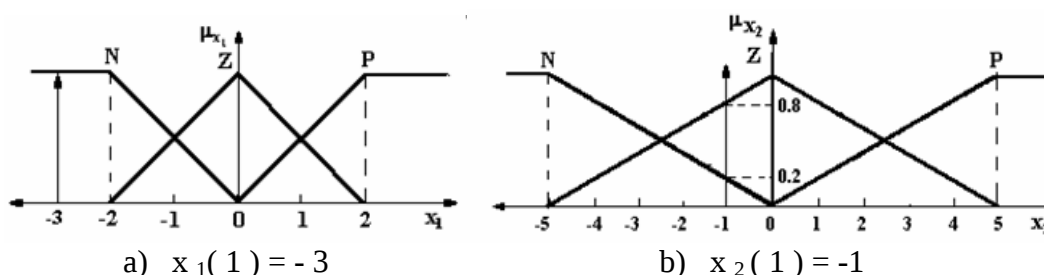


Fig. 7.22

Din tabela de control se obține:

Dacă ($x_1 = N$) și ($x_2 = N$), atunci ($u = NB$) ; $\min(1, 0.2) = 0.2$ (NB) ;

Dacă ($x_1 = N$) și ($x_2 = Z$), atunci ($u = N$) ; $\min(1, 0.8) = 0.8$ (N) .

Prin reuniunea consecvenților fuzzy și defuzzificarea ieșirii se obține la acest ciclu de inferență valoarea de control $u = -9.6$ (conform fig. 7.23).

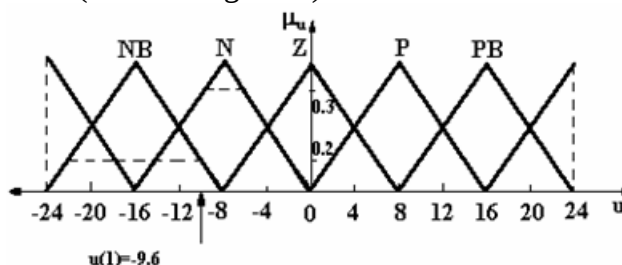


Fig. 7.23

Se utilizează în acest moment $u = -9.6$ pentru determinarea condițiilor inițiale corespunzătoare iterației 3 (aratate în figura 7.24), după cum urmează:

$$x_1(2) = x_1(1) + x_2(1) = -3 - 1 = -4 \quad ,$$

$$x_2(2) = x_1(1) + x_2(1) - u(1) = -3 - 1 - (-9.6) = +5.6 \quad .$$

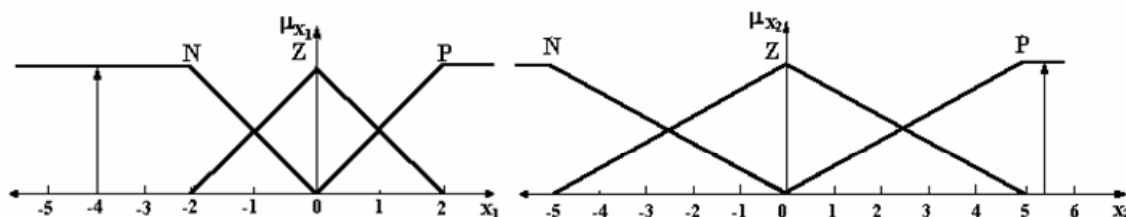


Fig. 7.24

Utilizând în continuare tabela de control se obține pentru aceste valori **regula**:

Dacă ($x_1 = N$) și ($x_2 = P$), atunci ($u = Z$) ; $\min(1, 1) = 1$ (Z) .

Rezultatele activării acestei reguli și valoarea defuzzificată a variabilei de control $u(z) = 0.0$

sunt aratate in figura 7.25 , noile valori initiale pentru iteratia urmatoare fiind:

$$x_1(3) = x_1(2) + x_2(2) = -4 + 5.6 = 1.6$$

$$x_2(3) = x_1(2) + x_2(2) - u(2) = -4 + 5.6 - (-0.0) = 1.6 \quad (\text{conform fig. 7.26}).$$

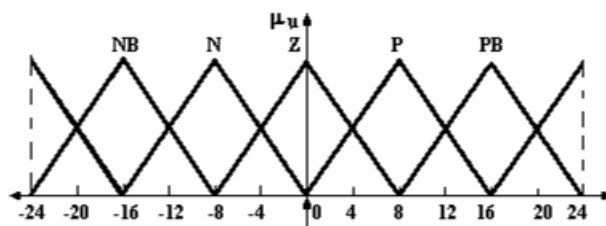


Fig. 7.25

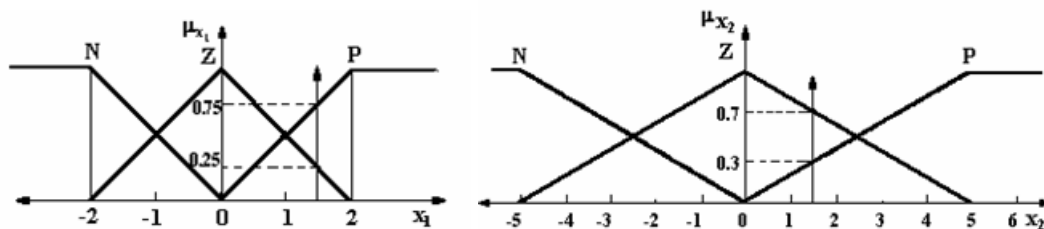


Fig. 7.26

Din tabela de control obtinem:

Daca $(x_1 = Z)$ si $(x_2 = P)$, atunci $(u = P)$; $\min(0.25, 0.3) = 0.3 (P)$;

Daca $(x_1 = Z)$ si $(x_2 = Z)$, atunci $(u = Z)$; $\min(0.25, 0.7) = 0.25 (Z)$;

Daca $(x_1 = P)$ si $(x_2 = P)$, atunci $(u = PB)$; $\min(0.75, 0.3) = 0.3 (PB)$;

Daca $(x_1 = P)$ si $(x_2 = Z)$, atunci $(u = P)$; $\min(0.75, 0.7) = 0.7 (P)$.

aratate grafic in figura 7.27, valoarea defuzzificata pentru marimea de comanda fiind

$$u(3) = 5.28 .$$

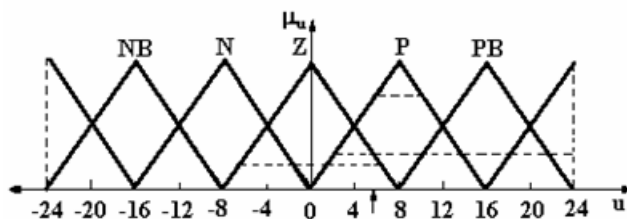


Fig. 7.27

Pentru $u(3) = 5.28$ se determina conditiile initiale pentru iteratia urmatoare, obtinându-se:

$$x_1(4) = x_1(3) + x_2(3) = 1.6 + 1.6 = 3.2 ;$$

$$x_2(4) = x_1(3) + x_2(3) - u(3) = 1.6 + 1.6 - (5.28) = -2.08 .$$

Rezulta in aceasta situatie valoarea $u(4) = 1.12$ si procesul de simulare poate continua cu un numar de pasi corespunzator pâna când actiunea de control duce sistemul intr-o stare stabila .

7.12. CONTROLUL FUZZY ADAPTIV

Cele mai multe procese din lumea reala, la care se aplica controlul automat, sunt neliniare, adica valorile parametrilor proprii se modifica odata cu schimbarea punctului de operare. Cum schemele de control conventionale sunt liniare, un controler poate fi reglat pentru a avea o buna performanta la un punct de operare particular, sau pentru o perioada limitata de timp. Controlerile trebuie sa fie reglate din nou daca punctul de operare se schimba, sau reglate periodic daca procesul este variabil in timp. Aceste considerente au condus la aparitia *controlerelor adaptive*, care se autoregleaza pentru a corespunde caracteristicilor curente ale procesului.

Controlerile fuzzy contin un numar de parametrii care se pot altera in vederea modificarii performantei si anume:

- regulile *if – then*; - factorii de scara; - multimile fuzzy reprezentand semnificatia valorilor lingvistice.

Vom utiliza numai primele doua metode.

Componenta adaptiva a controlerului fuzzy adaptiv consta din doua parti:

- a)- evaluarea performantei;
- b)- mecanismul de adaptare.

a)- Evaluarea performantei reprezinta o valoare pentru **corectia** ceruta la iesirea procesului y in vederea obtinerii unei bune performante.

De exemplu: *if E is VL and ΔE is VL, then C is NVL*,

unde C este **corectia ceruta**, Z = zero, S = mic (small), M = mediu, L = mare (large), J = exact (just), V = foarte (very), P = pozitiv, N = negativ. Adica, daca eroarea este mare si creste rapid, atunci este necesara o corectie mare pentru ca procesul sa revina la punctul de operare. Intreaga evaluare este descrisa in **tabelul de decizie** 7.5 (din [8]).

Tabelul 7.5

		Change in error (ΔE)												
		Towards set - point						Away from set - point						
		NVL	NL	NJL	NM	NJM	NS	Z	S	JM	M	JL	L	VL
Below set - point	NVL	Z	Z	Z	Z	Z	Z	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL
	NL	Z	Z	Z	JM	JM	M	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL
	NJL	Z	Z	Z	JM	JL	L	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL
	NM	Z	Z	Z	JM	JM	M	JL	JL	JL	JL	L	L	VL
	NJM	Z	Z	Z	Z	Z	Z	JM	JM	JM	M	JL	L	VL
Error E	NS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	S	S	S	JM	M	JL	L
	NZ	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	S	JM	M	J;
	PZ	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	NS	NJM	NM	NJL
	S	Z	Z	Z	Z	Z	Z	NS	NS	NS	NJM	NM	NJL	NL
	JM	Z	Z	Z	Z	Z	Z	NJM	NJM	NJM	NM	NJL	NL	NVL
Above set - point	M	Z	Z	Z	NJM	NJM	NM	NJL	NJL	NJL	NJL	NL	NL	NVL
	JL	Z	Z	Z	NJM	NJL	NL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL
	L	Z	Z	Z	NJM	NJM	NM	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL
	VL	Z	Z	Z	Z	Z	Z	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL

Starea controlului este monitorizata de *modulul "Rule Modification"*. Cand se detecteaza o iesire nedorita din process, regulile de control fuzzy sunt modificate pe baza corectiilor din tabelul de decizie.

Pentru a adapta controlerul este necesara o corectie corespunzatoare a **iesirii de control**. Deci corectia ceruta la **iesirea din proces** trebuie sa fie transmisa ca modificare a **intrarii in proces**, adica a **iesirii de control**.

Pentru un sistem cu o singura intrare si o singura iesire, daca evaluarea performantei specifica, la timpul nT , **corectia** ceruta la **iesirea procesului** $\Delta y (nT) = c (nT)$, atunci modificare impusa la **intrarea in proces**, sau **corectia intrarii**, este data de $r (nT) = c (nT)$, adica **ameliorarea intrarii se ia egala cu corectia ceruta la iesire** [2].

Aceasta *ameliorare (corectie) a intrarii* $r (nT)$ reprezinta cantitatea care trebuie adaugata intrarii in proces (adica - iesirii din controler), pentru a compensa slabele performante curente.

- b)- Mecanismul de adaptare

Se pune intrebarea: care iesiri din controler sunt responsabile de aceste slabe performante? Aceasta depinde de dinamica procesului. Un proces de ordin inalt, cu decalaje mari de timp, pretinde ajustarea pe o lunga perioada de timp a iesirilor din control, si viceversa. Iesirile din controler supuse corectiei se aleg in faza proiectarii sistemului de control .

Notam *esantionul actual de timp* cu n si admitem ca iesirea din controler, considerata cu m intervale de timp inapoi, are o influenta majora asupra performantei reglajului actual. Valorile numerice ale erorii, variatiei erorii si iesirii din controler la acel timp (din trecut) erau $e (nT - mT)$, $\Delta e (nT - mT)$ si $u (nT - mT)$, respectiv.

Aceste valori pot fi descrise de multimile fuzzy (analog cu (7.33)):

$$\tilde{L}\tilde{H}_{n-m}(h) = \begin{cases} 1, & \text{if } h = h(nT - mT) \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7.50)$$

unde $\tilde{h}$ este $\tilde{E}$, sau $\tilde{\Delta E}$, sau $\tilde{U}$, iar h este e , sau Δe , sau u , respectiv.

Raspunsul controlerului la m intervale de timp in trecut se poate exprima prin setul de n reguli:

if E is $LE^{(i)}_{n-m}$ and ΔE is $L\Delta E^{(i)}_{n-m}$, then U is $LU^{(i)}_{n-m}$, ($i = 1, 2, \dots, n$). (7.51)

Consideram, deci, ca evaluarea performantei clasifica performanta actuala ca slaba si indica modificarea iesirii din controler (considerata cu m intervale de timp in trecut), printr-o ameliorare a intrarii cu $r(nT)$; adica, iesirea din controler la acel moment (din trecut) trebuie sa fie:

$$v(nT - mT) = u(nT - mT) + r(nT) \quad (7.52)$$

si **nu** $u(nT - mT)$

Aceasta noua iesire din control este descrisa de multimea fuzzy:

$$\tilde{LV}_{n-m}(u) = \begin{cases} 1, & \text{if } u = u(nT - mT) + r(nT) \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7.53)$$

iar raspunsul corect al controlerului este descrisa de setul de n reguli:

if E is $LE^{(i)}_{n-m}$ and ΔE is $L\Delta E^{(i)}_{n-m}$, then U is $LV^{(i)}_{n-m}$, ($i = 1, 2, \dots, n$). (7.54)

Pentru a adapta controlerul sa reflecte acest nou raspuns, regula i (cea rea) care indica iesirea din control $LU^{(i)}_{n-m}$, trebuie sa fie stearsa si regula noua (cea buna) care indica iesirea din control $LV^{(i)}_{n-m}$, trebuie sa fie inserata in locul ei.

Consideram ca la esantionul de timp n setul complet de reguli este descris de relatia matriciala R_n . Semnificatiile regulilor *rea* (7.51) si *buna* (7.54) pot fi exprimate prin matricele cu relatii fuzzy: $R_{bad} = LE_{n-m} \times L\Delta E_{n-m} \times LU_{n-m}$; $R_{good} = LE_{n-m} \times L\Delta E_{n-m} \times LV_{n-m}$, (7.55)

unde "x" este produsul cartezian.

Trebuie sa fie generata o noua matrice relationala R_{n+1} care sa **nu** mai includa relatia R_{bad} , dar sa includa relatia R_{good} . Aceste cerinte se pot exprima simbolic:

$$R_{n+1} = (R_n \text{ but not } R_{bad}) \text{ else } R_{good}, \text{ adica } R_{n+1} = (R_n \cap R'_{bad}) \cup R_{good} \quad (7.56)$$

unde R' este complementul lui R ; altfel spus, in R_{n+1} toate elementele corespunzand lui R'_{bad} au fost inlocuite cu elementele lui R_{good} .

7.13. CONTROLERUL FUZZY

7.13.1. INTRODUCERE

In [3] se propune un controler fuzzy (fig. 7.28) cu o baza de reguli optima, realizata printr-un proces automat, adaptiv. El se compune din trei subsisteme:

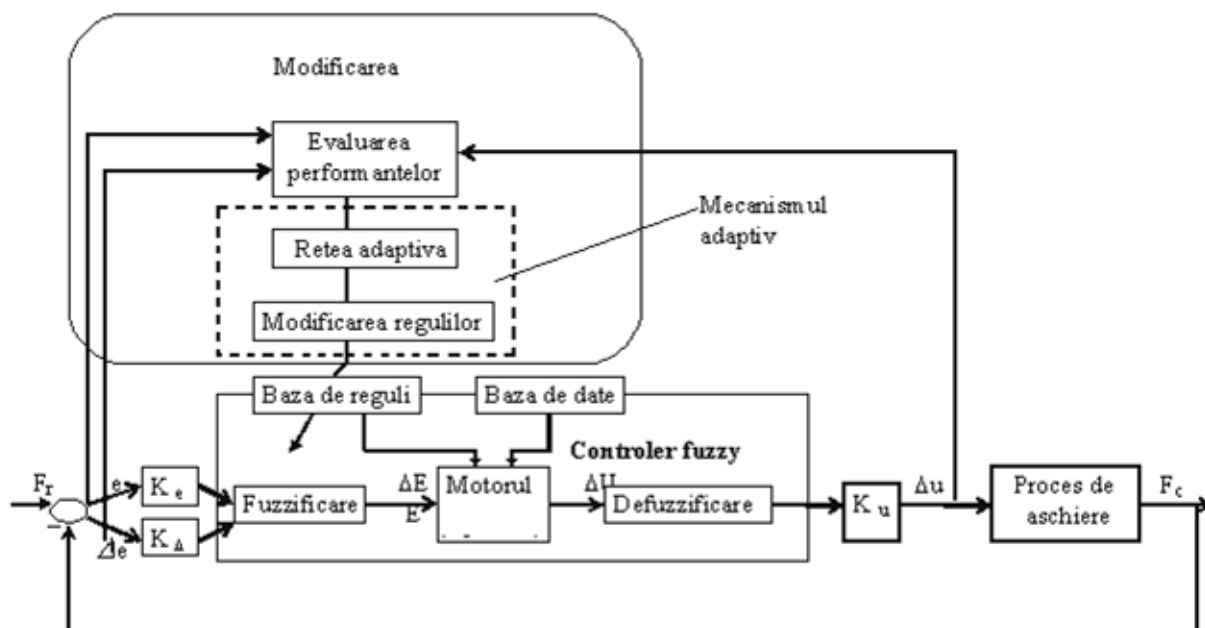


Fig. 7.28

- un controler fuzzy;

- factori de scara on-line *adaptati* pentru diferite conditii de aschiere;
- un subsistem off-line auto-instruibil pentru modificarea bazei de reguli.

Etapele proiectarii unui astfel de controler fuzzy adaptiv sunt urmatoarele:

1)- Stabilirea variabilelor de intrare

Variabilele de intrare **eroarea fortei** e si **variatiia erorii fortei** Δe au definitiile [analoage cu (7.5, 7.6)]:

$$e(j) = [F_r - F_c(j)] \cdot K_e, \quad (7.57)$$

unde F_r este valoarea de referinta a fortei de aschiere, iar F_c - valoarea curenta a acestei forte.

$$\begin{aligned} \Delta e &= (\text{eroarea curenta a fortei} - \text{eroarea precedenta a fortei}) \cdot K_{\Delta} = \\ &= [e(j) - e(j-1)] \cdot K_{\Delta} = [F_c(j-1) - F_c(j)] K_e K_{\Delta}, \end{aligned} \quad (7.58)$$

unde K_e si K_{Δ} sunt factorii de scara pe care ii vom explica mai jos.

In continuare, e si Δe sunt fuzzificate, devenind variabilele lingvistice E si ΔE , adecvate pentru rationamentul (inferenta) fuzzy.

2)- Generarea bazei de date

In figura 7.3 se prezinta functiile de apartenenta uzuale, pentru multimile fuzzy in domeniul E si ΔE . Figura 7.29 [3] ilustreaza functiile de apartenenta in domeniul iesirii ΔU , care urmeaza sa fie defuzzificate. Aceste functii sunt de tipul L (7.16), sau Γ (7.20).

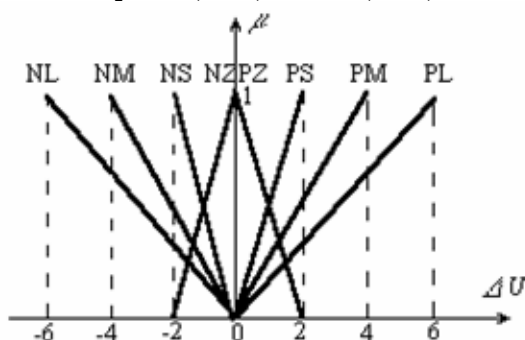


Fig. 7.29

3)- Generarea bazei de reguli

In general, o baza de reguli *simetrica* este mai adecvata scopurilor controlului [3]. In cazul controlerului fuzzy, fiecare element al multimii fuzzy este cuantificat cu un index intreg, ca in (7.11): $L_1 = NB, L_2 = NM, L_3 = NS, L_4 = NZ, L_5 = PZ, L_6 = PS, L_7 = PM, L_8 = PB$. (7.59)

Baza de reguli *initiala* se poate obtine din urmatoarea functie [6]:

$$g(i, j) = \langle P \cdot i + Q \cdot j + R \rangle, \quad (7.60)$$

unde P, Q si R sunt constante care se aleg; i, j si g sunt indicii multimilor fuzzy din (7.53); operatorul " $\langle \rangle$ " este definit prin relatia: $\langle a \rangle = \min\{8, \{1, \max\langle a \rangle_o\}\}$, (7.61)

in care $\langle a \rangle_o$ este intregul cel mai apropiat de a .

In scopul controlului este de dorit sa se genereze o baza de reguli fuzzy simetrica, in care P si Q au - in general - valori apropiate; R determina simetria axiala a tabelului. In tabelul 7.6 se

Tabelul 7.6

		E							
ΔU		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
ΔE	NB	NB	NM	NM	NM	NS	NS	NZ	PZ
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	NZ	PZ	PZ
	NS	NM	NM	NS	NS	NZ	PZ	PZ	PS
	NZ	NM	NS	NS	NZ	PZ	PZ	PS	PS
	PZ	NS	NS	NZ	NZ	PZ	PS	PS	PM
	PS	NS	NZ	NZ	PZ	PS	PS	PM	PM
	PM	NZ	NZ	PZ	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	NZ	PZ	PS	PS	PM	PM	PB	PB

prezinta o baza *initiala* de reguli, dedusa pentru : $P = 0.58$; $Q = 0.54$; $R = -0.54$,
 deci $g(i, j) = \langle 0.58 * i + 0.54 * j - 0.54 \rangle = \langle 0.54 * (i + j - 1) + 0.04 * i \rangle$. (7.62)

De exemplu: pentru $i = 3$, (adica $E = L_3 = NS$) si $j = 6$ (adica $\Delta E = L_6 = PS$) se obtine: $g(3, 6) = \langle 0.54 * 8 + 0.04 * 3 \rangle = \langle 4.44 \rangle = \min \{8, \max \{1, 4\}\} = 4$, deci $\Delta U = L_4 = NZ$;
 $g(7, 8) = \langle 0.54 * 14 + 0.04 * 7 \rangle = \langle 7.84 \rangle = \min \{8, 8\} = 8$, deci $\Delta U = L_8 = PB$.
 Cateva elemente din tabelul 7.6 difera numai cu o treapta de omoloagele lor din tabelul 7.1, din cauza generarii numerice a primelor.

Aceasta generare automata a bazei de reguli necesita modificari ulterioare; o tehnica adaptiva pentru ameliorarea performantelor se prezinta in continuare.

4)- Generarea iesirii din mecanismul de inferenta

Regulile lingvistice de control au forma:

Regula i, j : Daca E este A_i si ΔE este B_j atunci ΔU este C_{ij} , ($i, j = 1, 2, \dots, 8$), (7.63)

unde A_i, B_j si C_{ij} sunt valori lingvistice.

In controlerul nostru sunt $8 * 8 = 64$ reguli de control.

Example

Consideram valoarea exacta $e^* = 2.25$ si $\Delta e^* = 6.1$. Din figura 7.30 (dedusa din figurile 7.3 si 7.29) se constata ca in acest caz urmatoarele valori lingvistice si respectivele grade fuzzy vor fi activate: " E ": $PS \leftrightarrow \mu_{PS}(2.25) = 0.75$; $PM \leftrightarrow \mu_{PM}(2.25) = 0.25$.

" ΔE ": $PB \leftrightarrow \mu_{PB}(6.1) = 1$.

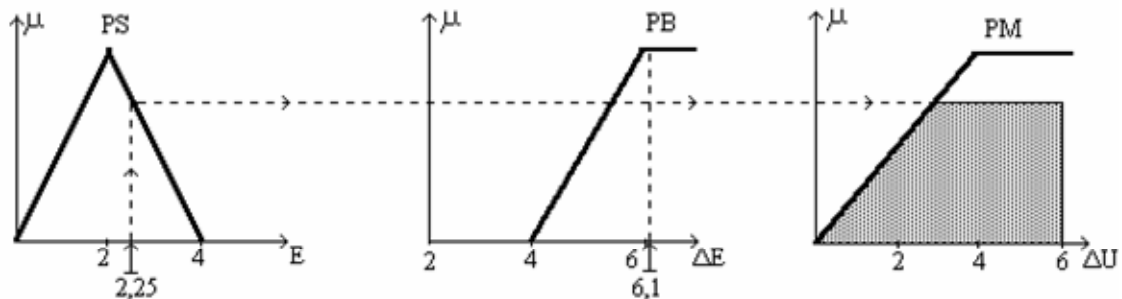


Fig. 7.30

Ca urmare, din baza de reguli (tab. 7.6) numai doua reguli sunt activate:

$R(6, 8)$: If E is PS and ΔE is PB , then ΔU is PM ;

$R(7, 8)$: If E is PM and ΔE is PB , then ΔU is PB .

Observatie: Valoarea lui ΔE a fost deliberat aleasa $\Delta e > 6$ pentru reducerea (la doua) a numarului regulilor activate; daca am fi ales o valoare $|\Delta e| < 6$, ar fi fost activate 4 reguli.

In figurile 7.30 si 7.31 se poate vedea aplicarea modului de lucru (fig. 7.10) pentru cele doua reguli de mai sus. In figura 7.30, pentru $R(6, 8)$: $\mu_{ant} = \min(0.75; 1) = 0.75$; in a treia figura apare multimea fuzzy retezata (hasurata) μ_{CPM} . In figura 7.31, pentru $R(7, 8)$: $\mu_{ant} = \min(0.25; 1) = 0.25 \Rightarrow \mu_{CPB}$.

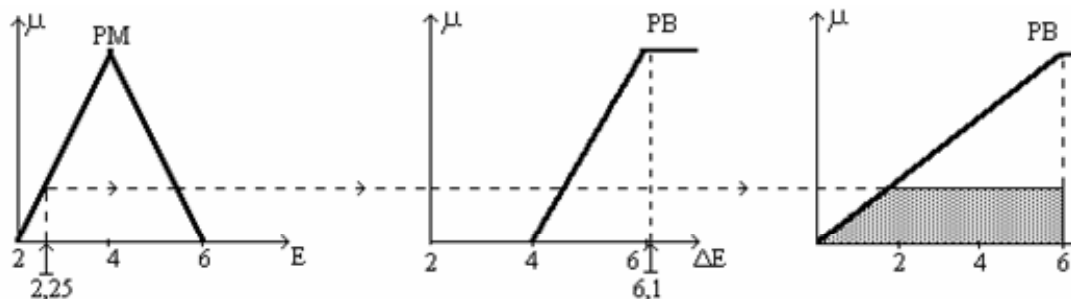
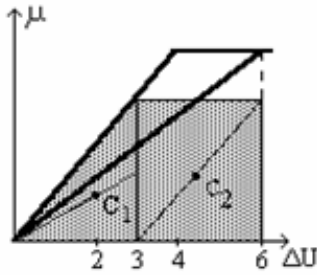


Fig. 7.31

In figura 7.32, in concordanta cu relatia (7.46):

$$\mu_{\Delta U}(\Delta u) = \max(\mu_{CPM}, \mu_{CPB}).$$

5)- Defuzzificarea iesirii



Iesirea Δu , utilizata la modificarea avansului masinii, o obtinem cu metoda (abscisei) centrului de masa. Pentru suprafata hasurata din figura 7.32, centrul de masa are abscisa:

$$\Delta u^* = \frac{A_1 \Delta u_{c1} + A_2 \Delta u_{c2}}{A_1 + A_2} = \frac{(3 \cdot 0.75 / 2) \cdot 2 / 3 + 3 \cdot 0.75 \cdot 4.5}{3 \cdot 0.75 / 2 + 3 \cdot 0.75} = 3.67 ; \text{ and } \Delta u = \Delta u^* \cdot K_u \quad (7.64)$$

7.13.2. ADAPTAREA ON - LINE A FACTORILOR DE SCARA

Fig. 7.32 Marirea factorilor de scara a intrarii K_e si K_A duce la cresterea sensibilitatii in apropierea punctului de functionare stabila, o mai mica sensibilitate in timp si viceversa. Pe de alta parte, alegerea unui mic factor K_u are ca efect o crestere lenta in timp a raspunsului [3].

Obiectivul controlului, in cazul controlerului fuzzy adaptiv pentru mentinerea fortei de aschiere *constanta*, este realizarea unei *benzi de toleranta in jurul fortei de referinta*. Daca forta cade inaintul acestei benzi, controlerul trebuie sa genereze actiuni de control mici, sau neglijabile, astfel ca sa nu afecteze serios procesul de aschiere. La aparitia unei schimbari bruste a conditiilor de aschiere, forta va iesi din aceasta banda si controlerul trebuie sa genereze o actiune de control substantiala, pentru a compensa aceasta eroare semnificativa a fortei.

Pentru o aschiere cu freza deget in [3] s-a luat **valoarea de referinta** a fortei de aschiere $F_r = 20$ N, cu o **banda de toleranta** de $\pm 10\%$, iar factorul de scara:

$$K_e = \begin{cases} 0.2 & \text{daca } |F_r - F_c| \leq 2 \\ 1 & \text{daca } |F_r - F_c| > 2 \end{cases}, \quad (7.65)$$

numarul 2 fiind 20 % din 20 N.

Factorul de scara pentru variatia erorii - care are un rol important in raspunsul tranzitoriu - s-a luat $K_A = 3$.

Factorul de scara al iesirii K_u joaca rolul de factor general de amplificare al controlerului, adica mentine amplificarea intregului sistem constanta, astfel ca o forta constanta este imuna la schimbarile conditiilor de aschiere. Este evident ca supraincercarea sculei va duce la distrugerea ei, fiind de dorit regimul de subincarcare. Ca urmare, in [3] se prevede:

$$K_u = \begin{cases} [0.0003 \times e(nT) + 0.0084] \times U_{com}(nT - T), & \text{daca } e(nT) \geq 0 \text{ subincarcare } (F_c \leq F_r); \\ [-0.0005 \times e(nT) + 0.0157] \times U_{com}(nT - T), & \text{daca } e(nT) < 0 \text{ supraincercare } (F_c > F_r), \end{cases} \quad (7.66)$$

unde nT este esantionul curent de timp, iar U_{com} este comanda avansului masinii.

Se observa ca in cazul supraincercarii constantele alese sunt aproape duble in comparatie cu cele de la subincarcare, controlerul realizand astfel o scadere rapida a avansului in situatia supraincercarii si o crestere lenta la subincarcare, prevenind astfel distrugerea sculei.

7.13.3. ALGORITMUL ADAPTIV

Ecuatiile (7.60 si 7.61) genereaza o baza de reguli foarte elementara; sunt necesare modificari ulterioare pentru a atinge performante de control mai bune. Pentru ameliorarea controlului este necesara **o corectie corespunzatoare aplicata intrarii in proces**.

a)- Evaluarea performantelor

Intrucat scopul controlului este mentinerea fortei de aschiere in cadrul unei benzi de toleranta, tinta controlului se va lua in jurul erorii nule, adica $T = \{NZ, PZ\} = \{L_4, L_5\}$. (7.67)

Intr-un controler fuzzy *adaptiv* calitatea controlului este data de patru elemente: $e(nT - mT)$, $\Delta e(nT - mT)$, $\Delta u(nT - mT)$ si $e(nT)$, respectiv. Aceste valori se pot descrie prin multimi fuzzy:

$$E(nT - mT) = F[e(nT - mT)] ; \Delta E(nT - mT) = F[\Delta e(nT - mT)] ;$$

$$\Delta U(nT - mT) = F[\Delta u(nT - mT)] ; E(nT) = F[e(nT)] , \quad (7.68)$$

unde F reprezinta procesul de fuzificare, iar aceste patru submultimi apartin multimii de valori lingvistice (7.59): $\{L_1, L_2, \dots, L_8\}$, fiind notate - respectiv - cu: $L_i, L_j, L_{K_{ij}}, L_{p_{ij}}$. Ca urmare, un set de date D_n corespunzator unui moment oarecare se poate defini:

$$D_n = \{i, j, K_{ij}, p_{ij}\}, (n = 1, 2, \dots, N), \quad (7.69)$$

unde N este numarul esantioanelor de timp.

Relatia (7.68) arata ca marimile corespunzatoare simbolurilor i, j si K_{ij} (la m intervale de timp in trecut) sunt dominante pentru performanta prezenta p_{ij} .

b)- Mecanismul adaptiv este compus din:

b1)- Reteaua adaptiva

Toate seriile D_n se vor procesa in cadrul retelei adaptive (ce contine $8 \times 8 = 64$ noduri) ca in figura 7.33, generand o corectie ΔK_{ij} care modifica baza de reguli.

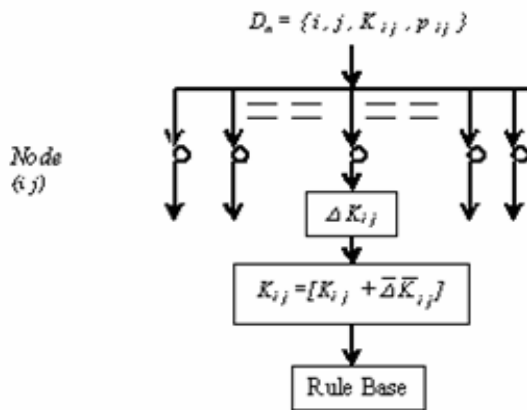


Figura 7.33

Pentru fiecare intrare D_n , in retea se va activa nodul (i, j) care va furniza o ameliorare ΔK_{ij} , adecvata gradului de **bun** sau de **rau** a actiunii de control corespunzatoare. De exemplu, daca o actiune de control PB (adica $K_{ij} = 8$) produce - dupa m intervale de timp - o eroare NB (adica $p_{ij} = 1$) atunci reducand actiunea de control, va rezulta o eroare mai mica; deci trebuie sa se genereze o corectie negativa.

Corectia este definita in [3] prin relatia:

$$\Delta K_{ij} = \begin{cases} w(p_{ij} - 4), & \text{daca } p_{ij} \leq 4 ; \\ w(p_{ij} - 5), & \text{daca } p_{ij} > 4 . \end{cases} \quad (7.70)$$

unde w este o pondere a carei marime se determina prin simulare si experiment.

b2)- Modificarea regulilor

Noul indice K_{ij} va fi: $K_{ij} = \text{cel mai apropiat intreg de } (K_{ij} + \bar{\Delta K}_{ij})$, (7.71)

unde $\bar{\Delta K}_{ij}$ este media valorilor ΔK_{ij} pentru nodul (i, j) rezultate din prelucrarea unui grup de date.

7.13.4. SIMULARE

Consideram strunjirea semifabricatului din figura 7.34, parametrii regimului de aschiere fiind:

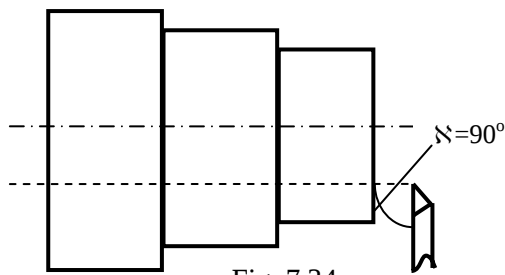


Fig. 7.34

$n = 1500 \text{ rot / min.} = 25 \text{ rot / s.} ; s = 0,2 \text{ mm / rot.} ; t_{min} = 0,2 \text{ mm} ; t_{max} = 0,7 \text{ mm} ;$
 perioada de esantionare $\Delta T = 0,02 \text{ s.}$ (7.72)

Fora de aschiere - la strunjire - are componentele: F_x - forta radiala (de respingere), F_y - forta tangentiala (principala), F_z - forta axiala (de avans). Aceste componente au expresiile [7]:

$$F_x = C_x(HB)^e \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\cos N}{\cos 45^\circ} \right)^2 \right] t^{0,9} s^{0,75} [daN]$$

$$F_y = C_x(HB)^e \left(\frac{\sin 45^\circ}{\sin N} \right)^{0,25} t s^{0,75} [daN] \quad (7.73)$$

$$F_z = C_z (HB)^e \left(\frac{\sin \aleph}{\sin 45^\circ} \right)^{0,5} t s^{0,4} [daN]$$

in care: t este adancimea de aschiere [mm];

s - avansul [mm / rot];

HB - duritatea Brinell a materialului prelucrat;

$\aleph$ - unghiul de atac principal;

C_x, C_y, C_z si e au valorile din tabelul 7.7.

Tabelul 7.7

Material	Duritate HB	C_x	C_y	C_z	E
Oteluri si	≤ 170	18.13	27.9	11.16	0.35
aliaje de Al	> 170	2.32	3.57	1.43	0.75

Fora de aschiere rezultanta, care se doreste a fi constanta, este: $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$. (7.74)

Calculam $F_{ext} = F(t_{ext})$, ($ext = min, max$) ; $t_{med} = (t_{min} + t_{max}) / 2$. (7.75)

Fora de referinta o luam: $F_r = F(t_{med})$, (7.76)

iar relatia (7.65) o substituim cu: $K_e = \begin{cases} 0,2 & \text{daca } |F_r - F_c| \leq 0,1 \cdot F_r \\ 1 & \text{daca } |F_r - F_c| > 0,1 \cdot F_r \end{cases}$, (7.77)

0,1 reprezentand banda de toleranta de 10 %.

Calculam: $E_{ext} = (F_r - F_{ext}) K_e$, ($ext = min, max$) ; $E_m = MAX(|E_{min}|, |E_{max}|)$.

Aplicam relatia (7.21): $E_n = \left(\frac{6}{E_m} \right) \cdot E$. (7.78)

Vom alege ΔE_m , iar $\Delta E_n = \left(\frac{6}{\Delta E_m} \right) \cdot \Delta E$. (7.79)

Marimile normalizate E_n si ΔE_n sunt reprezentate grafic in figura 7.3, ΔU este in figura 7.29, iar baza **initiala** de reguli este in tabelul 7.6.

Sa vedem cum variaza in timp forta principala de aschiere la intrarea cutitului in semifabricatul din figura 7.34:

- experienta arata ca intrarea cutitului in semifabricat nu se produce la primul contact, ci dupa timpul $K_1 T$ (din cauza **elasticitatii** sistemului mecanic), unde T este perioada unei rotatii complete a piesei, iar K_1 - un coeficient ce se poate determina experimental inregistrand variatia fortei de aschiere si observand momentul cand aceasta incepe sa creasca.

- dupa intrarea cutitului in semifabricat este evident ca la prima rotatie, grosimea aschiei ($a = s$, s fiind avansul) variaza liniara: $a = \lambda \tau$.

In [5] la pag. 379 se prezinta - sub forma unor curbe - rezultatele unui experiment privind influenta variatiei grosimii aschiei asupra apasarii specifice ($p = F_z / (a \cdot b)$, in care $b = t$, b fiind latimea aschiei, iar t - adancimea de aschiere). Experimentul este realizat pentru procesul de

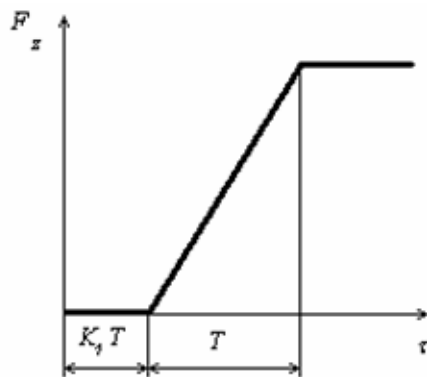


Fig. 7.35

brosare, dar cum **strunjirea** este un proces similar, consideram ca rezultatele se pot extrapola. Curbele - trasate pentru diferite materiale - se pot suficient de bine aproxima cu **hiperbole**:

$p = c / t$; dar $p = F_z / (s \cdot t)$, deci $c / t = F_z / (s \cdot t) \Rightarrow F_z = c \cdot s = c \lambda \tau$; $F_z = K_2 \tau$.

La urmatorul prag ($t = 0.4$) din figura 7.34, rationamentul se repeta, dar valoarea initiala a fortei F_z este egala cu valoarea ei finala din figura 7.35.

BIBLIOGRAFIE

1.- **Gh. Bastiurea, s.a., Comanda numerica a masinilor unelte**, Editura tehnica, 1976

- 2.- **D. Driankov, s.a.**, *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer-Verlag, 1993
- 3.- **P. L. Hsu, W. R. Fann** *Fuzzy Adaptive Control of Machining Processes With a Self - Learning Algorithm*, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, nov. 1996, vol. 118, pag. 522
- 4.- **Y. Koren** *Control of Machine Tools*, in Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, nov. 1997, vol. 119, pag. 749
- 5.- **A. Oprean, s.a.**, *Bazele aschierii si generarii suprafetelor*, EDP, Bucuresti, 1981
- 6.- **X. T. Peng** *Generating Rules for Fuzzy Logic Controller*, in *Fuzzy Sets and Systems*, 1990, vol. 36, no. 1, p. 83 - 89
- 7.- **C. Picos, et al.** *Normarea tehnica pentru prelucrari prin aschiere*, Editura Tehnica, Bucuresti, 1979
- 8.- **T. J. Procyk, E. H. Mamdani** *A Linguistic Self - Organizing Process Controler*, Automatica, 15 (1), 1979
- 9.- **L. A. Zadeh et al.** *Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes*, New York, Academic Press, 1975
- 10.- **V . Mazilescu** *Sisteme de inteligenta artificiala*, Vol. II, Editura PAX AURA MUNDI, Galati, 1998