

TEORIA MULȚIMILOR FUZZY: APLICABILITATE ÎN ENERGETICĂ

ing. Daniela Andone
dr. ing. Radu Dobrescu
dr. ing. Sergiu Stelian Ilescu

Universitatea Politehnica București,

Rezumat: Lucrarea prezintă aplicații ale tehnologiei fuzzy în conducerea, proiectarea, operarea și managementul proceselor energetice. Articolul include o expunere a elementelor fundamentale ale teoriei mulțimilor fuzzy. Sunt prezentate aplicații bazate pe tehnologia fuzzy în controlul proceselor energetice, în planificarea distribuției de energie, în managementul echipamentelor de rezervă, în cazul sistemelor cu structura necunoscută, fluctuații de parametri, incertitudine asupra datelor. Scopul lucrării este de a demonstra că metodologia fuzzy conferă un aport de siguranță în rezolvarea problemelor dificile cu care se confruntă sistemele energetice.

Cuvinte cheie: sisteme fuzzy, mulțimi fuzzy, controller fuzzy, sistem energetic.

1. Introducere

Promotorul teoriei mulțimilor fuzzy, profesorul L. Zadeh, afirmă că aceasta este un instrument util în modelarea problemelor cu caracter negradual sau prea complexe pentru a fi modelate adecvat prin metode tradiționale.

Prin proiectarea de instrumente care să faciliteze sau să facă mai eficientă modelarea problemelor complexe cu ajutorul tehnologiei fuzzy, numărul și dimensiunea ariei de aplicabilitate a acestei tehnologii au crescut rapid.

Teoria mulțimilor fuzzy se utilizează în următoarele scopuri:

- modelarea incertitudinilor –incertitudinea poate fi modelată prin diferite teorii, în funcție de cauzele incertitudinii, de tipul și de cantitatea informațiilor disponibile etc. Teoria mulțimilor fuzzy este, în acest sens, una dintre metodele care pot fi utilizate pentru a modela diferite tipuri de incertitudini, în diferite circumstanțe;
- generalizare – modelele și metodele clasice sunt, în mod normal, bazate pe logica bivalentă. Adesea, această abordare nu surprinde adecvat realitatea. Teoria mulțimilor fuzzy a fost utilizată cu precădere în scopul relaxării sau al generalizării metodelor clasice, de caracterul gradual;
- simplificare – tehnologia fuzzy se utilizează în scopul reducerii complexității datelor la un grad acceptabil fie prin variabile lingvistice sau prin analiza fuzzy a datelor;
- procesarea cunoașterii – în raționamentul aproximativ, cuvintelor și propozițiilor li se

atașează senzori. Motorul de inferență nu procesează simboluri, ci expresii lingvistice cu un anume sens.

Tehnologia fuzzy a fost aplicată în multe din problemele tradiționale, iar recent, a fost aplicată în domenii ca tehnologia informației, telecomunicații, controlul traficului și, nu în ultimul rând, în sistemele energetice.

Sectorul energetic are o importanță strategică. Complexitatea, dimensiunea și diversitatea proceselor tehnologice pe care le include accentuează interesul specialiștilor din diverse domenii în dezvoltarea sa.

Creșterea competiției și presiunea în reducerea costurilor de alimentare cu energie forțează managerii de centrale și inginerii să forțeze din ce în ce mai tare sistemul în fiecare an, așteptând să obțină aceleași niveluri de fiabilitate sau chiar creșterea acestora.

Operarea și controlul sistemelor energetice se realizează pe sisteme în funcțiune ale căror parametri și structură fluctuează în mod constant. Aceste schimbări și fluctuații necesită reacții rapide pentru a compensa deviațiile și pentru a furniza stabilitate sistemului energetic. Natura fluctuațiilor și răspunsul sistemului este imprevizibilă, deci, managementul și planificarea sistemului energetic se confruntă cu incertitudinea asupra cererii de energie, acces limitat la date precum și schimbări ale condițiilor economice, politice și sociale.

Managerii și inginerii acestor sisteme trebuie să crească eficiența producției de energie electrică într-un mediu variabil, al cărui comportament este greu de prezis sau în lipsa datelor sigure.

Această problemă poate fi rezolvată prin aplicații ale metodologiilor inteligente de conducere. Aplicații bazate pe sisteme expert, rețele neurale și mulțimi fuzzy se pot utiliza în controlul, operarea și managementul sistemelor energetice în noile condiții.

Teoria mulțimilor fuzzy este recunoscută de numeroși cercetători și ingineri ca o metodă care poate furniza instrumente moderne în rezolvarea a numeroase probleme ale sistemului energetic, în particular, în cazul unei structuri necunoscute a sistemului și fluctuații de parametri. Este, de

asemenea, o tehnică promițătoare în cazul proceselor necunoscute, în absența datelor sigure.

Se va demonstra că metodele fuzzy pot rezolva numeroase probleme dificile, aducând un plus de calitate care va conduce la o alimentare mult mai sigură cu energie electrică.

După o introducere în teoria mulțimilor fuzzy, lucrarea prezintă aplicațiile tehnologiei fuzzy în control de proces, planificarea distribuției de energie, managementul rezervelor, demonstrând potențialul aplicativ al acestei tehnologii în conducerea, proiectarea, operarea și managementul proceselor energetice.

2. Formalismul matematic al controlului fuzzy

2.1. Mulțimi fuzzy

Bazele teoriei mulțimilor fuzzy au fost puse de L. A. Zadeh, în anul 1965, [4], și au fost dezvoltate în numeroase lucrări care au permis stabilirea unui formalism riguros [1], [3], [5]. Modelul teoriei mulțimilor fuzzy este *logica continuă*, spre deosebire de teoria clasică având ca model logica bivalentă, care admite două valori de adevăr: *adevarat* și *fals*. Într-o logică bivalentă există o tranziție netă de la adevăr la fals, de la apartenență la neapartență. Într-o mulțime fuzzy, nu există o tranziție netă de la apartenență la neapartență pentru un element din mulțime. Altfel spus, noțiunea de mulțime fuzzy constituie o abordare dintr-un punct de vedere diferit a conceptului de mulțime: între apartenența unui element la o mulțime și nonapartență există o serie de situații tranzitorii, de natura continuă, așa numite *grade de apartenență*.

Definiția 1. O mulțime fuzzy F în U reprezintă o mulțime de perechi ordonate $F = \{(u, \mu_F(u)) | u \in U\}$, în care u este un element generic, iar $\mu_F : U \rightarrow [0,1]$ poartă numele de funcție de apartenență.

Definiția 2. Suportul mulțimii fuzzy A este definit prin:

$$S(A) = \{u \in X | \mu_A(u) > 0\} \quad (2.1)$$

Definiția 3. Nucleul mulțimii A este definit prin:

$$\text{nucleus}(A) = \{u \in X | \mu_A(u) = 1\} \quad (2.2)$$

Definiția 4. Reuniunea a două mulțimi fuzzy A , B reprezintă o mulțime fuzzy $A \cup B$ a cărei funcție de apartenență este definită pentru $\forall u \in U$ astfel:

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (2.3)$$

Definiția 5. Intersecția a două mulțimi fuzzy A , B reprezintă o mulțime fuzzy $A \cap B$ a cărei funcție de apartenență $\mu_{A \cap B}$ este definită pentru $\forall u \in U$ astfel:

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A, \mu_B\} \quad (2.4)$$

Definiția 6. Complementul unei mulțimi fuzzy A în raport cu universul de definiție U este o mulțime fuzzy \bar{A} a cărei funcție de apartenență $\mu_{\bar{A}}$ este definită pentru $\forall u \in U$ astfel:

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (2.5)$$

Definiția 7. Se numește normă triunghiulară (T-norma) o clasă de funcții de două variabile, $\hat{*}$ care satisface următoarele criterii:

$$\begin{aligned} a \hat{*} b &= b \hat{*} a; \\ (a \hat{*} b) \hat{*} c &= a \hat{*} (b \hat{*} c); \\ a \leq c \text{ și } b \leq d &\text{ implică } a \hat{*} b \leq c \hat{*} d; \\ a \hat{*} 1 &= a \end{aligned} \quad (2.6)$$

Definiția 8. Se numește co-normă triunghiulară (S-norma) o clasă de funcții de două variabile, care satisface primele trei criterii ale normei triunghiulare, dar:

$$a \hat{*} 0 = a \quad (2.7)$$

Definiția 9. Fie A_1, A_2, \dots, A_n mulțimi fuzzy descrise în U_1, U_2, \dots, U_n , se numește produs cartezian al mulțimilor fuzzy o mulțime definită în spațiul produs $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ a cărei funcție de apartenență este:

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min\{\mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n)\} \quad (2.8)$$

2.2 Relații fuzzy

Definiția 10. Fie U și V universul (domeniul) de definiție continuu și $\mu_R : U \times V \rightarrow [0,1]$, atunci:

$$R = \int_{U \times V} \mu_R(u, v) / (u, v) \quad (2.9)$$

este o relație fuzzy, definită pe $U \times V$. Dacă U și V sunt discrete, atunci:

$$R = \sum_{U \times V} \mu_R(u, v) / (u, v) \quad (2.10)$$

Definiția 11. Fie R și S două relații definite pe $U \times V$, se definește intersecția acestor două relații ca fiind o relație de tipul:

$$\forall (u, v) \in U \times V: \mu_{R \circ S}(u, v) = \min(\mu_R(u, v), \mu_S(u, v)) \quad (2.11)$$

unde, în loc de min se poate folosi orice T-norma.

Definiția 12. Fie R și S două relații definite pe $U \times V$, se definește reuniunea acestor două relații ca fiind o relație de tipul:

$$\forall (u, v) \in U \times V: \mu_{R \cup S}(u, v) = \max(\mu_R(u, v), \mu_S(u, v)) \quad (2.12)$$

unde, în loc de max se poate folosi orice S-norma.

Definiția 13. Proiecția lui R pe V se definește astfel:

$$\text{proj } R \text{ on } V = \int_V \sup_{x_1, \dots, x_n} \mu_R(x_1, \dots, x_n) / (x_1, \dots, x_n) \quad (2.13)$$

Definiția 14. Extensia cilindrică a lui S în U este:

$$\text{ce}(S) = \int_U \mu_S(x_1, \dots, x_n) / (x_1, \dots, x_n) \quad (2.14)$$

Definiția 15. Dacă A este o mulțime fuzzy definită pe X și R o relație fuzzy definită pe

$X \times Y$, se numește compunerea celor două relații A și R și se notează cu B mulțimea fuzzy definită pe Y cu:

$$B = A \circ R = \text{proj}(\text{ce}(A) \cap R) \text{ pe } Y \quad (2.15)$$

2.3. Controlere fuzzy

Controlerul fuzzy (FLC – Fuzzy Logic Controller) emulează modul de operare al unui expert uman prin implementarea regulilor de decizie după care acesta acționează. Principalele componente ale unui controler fuzzy sunt:

Modulul de fuzificare (FM)

Modulul de fuzificare realizează următoarele funcții:

- măsoară variabilele de stare;
- realizează o transformare de scală, care mapează valorile fizice ale variabilelor de stare curente ale procesului într-un domeniu normalizat. De asemenea, mapează valorile

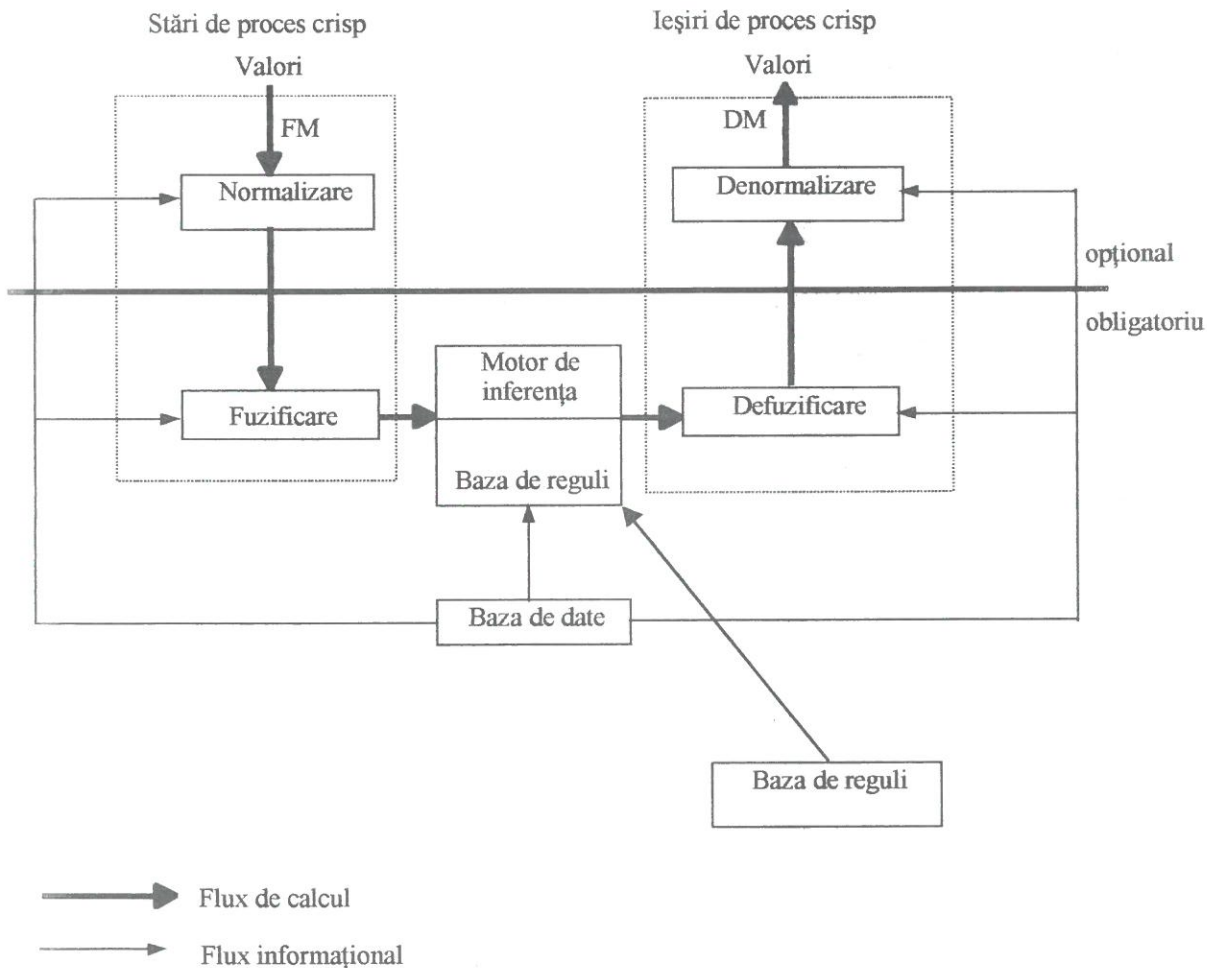


Figura 3.1. Structura FLC

normalizate ale variabilelor de ieșire din proces în domeniul fizic;

- realizează așa numita fuzificare care convertește o valoare crisp, valoare curentă a variabilei de stare a procesului într-o mulțime fuzzy.

Parametrul de proiectare pentru FM este alegerea strategiei de fuzificare.

Baza de cunoștințe

Baza de cunoștințe a FLC conține baza de date și baza de reguli.

Funcția principală a bazei de date este de a furniza informațiile necesare pentru funcționarea corespunzătoare a modului de fuzificare, a bazei de reguli și a modului de defuzificare. Aceste informații includ:

- mulțimi fuzzy (funcții de apartenență);
- domeniul fizic și factorii de normalizare/denormalizare (scală);

Parametrii de proiectare ai bazei de date includ:

- alegerea funcțiilor de apartenență;
- alegerea factorilor de scală.

Funcția principală a bazei de reguli este de a reprezenta, într-o manieră structurată, strategia de control a unui operator de proces sau a unui inginer automatist într-un set de reguli de producție:

dacă <stare proces> atunci <comandă>

Parametrii de proiectare, implicați în construcția bazei de reguli, includ:

- alegerea variabilelor de stare din proces și a variabilelor de comandă;
- alegerea conținutului pentru premisa (antecedentul) *if* și pentru consecința (concluzia) *then* a regulilor;
- alegerea gamei de valori lingvistice pentru variabilele lingvistice de mai sus;
- derivarea unui set de reguli.

Motorul de inferență

Motorul de inferență reprezintă nucleul regulatorului fuzzy și simulează procesul de decizie umană pe baza conceptelor fuzzy, a implicației și a regulilor de inferență în logica fuzzy.

În acest context, parametrii de proiectare pentru motorul de inferență sunt:

- alegerea reprezentării conținutului unei singure reguli de producție;

- alegerea reprezentării conținutului unui set de reguli;
- alegerea motorului de inferență;
- testarea setului de reguli pentru asigurarea consistenței.

Modulul de defuzificare (DM)

Funcțiile DM sunt următoarele:

- realizează o scalare în gama valorilor de ieșire;
- defuzifică, deci transformă, mărimea fuzzy într-o mărime crisp, care reprezintă comanda generată.

Parametrii de proiectare pentru DM sunt:

- alegerea operatorilor de defuzificare.

3. Aplicații ale tehnologiei fuzzy în controlul proceselor energetice

3.1. Controlul fuzzy al proceselor dintr-o centrală solară

În ultimii ani, au fost depuse eforturi considerabile pentru îmbunătățirea eficienței centralelor solare din punctul de vedere al controlului și optimizării procesului. Caracteristica principală a proceselor dintr-o centrală solară este aceea că sursa primară de energie, radiația solară, nu poate fi controlată. Aceasta variază pe parcursul zilei, cauzând schimbări în dinamica procesului și perturbații puternice. Procesul este, deci, caracterizat prin perturbații și variații în dinamică, datorate variației condițiilor atmosferice și condițiilor de operare. O schemă de control, bazată pe logica fuzzy, a fost aplicată cu succes în centrala solară din Almería (Spania) [6]. S-a utilizat o subclasă specială de inferență fuzzy (TPE – triangular partition rule bases with evenly spaced midpoints) în dezvoltarea unui controler fuzzy de tip PI. Prin utilizarea sistemului de inferență fuzzy TPE, volumul de calcul, necesar pentru procesarea intrărilor, este independent de numărul de reguli. Strategia se adoptă în cazul proceselor dificil de controlat, dar în care există o largă experiență a operatorului de proces, care poate fi încorporată într-un sistem bazat pe reguli. Implementarea strategiei de control fuzzy realizează controlul sistemului în întreaga gamă de condiții de operare a centralei solare, compensând efectul perturbațiilor sistemului. Se remarcă ușurința implementării și rezultatele bune la primele teste, precum și un grad mare de robustețe a controlerului fuzzy, furnizând rezultate bune în ciuda variațiilor radiației solare sau a condițiilor de operare.

Soluții fuzzy pentru reglarea principalilor parametri ai cazanelor de abur

În automatizarea unui bloc energetic, un loc important îl ocupă reglarea automată a parametrilor cazanului cu abur. Prin reglarea automată a cazanelor de abur trebuie să se asigure egalitatea dintre debitul de abur produs de cazan și al celui cerut de consumator, păstrându-se constanți parametrii de calitate ai aburului, presiunea și temperatura, cu un consum minim de combustibil. Rezultate deosebite s-au obținut în aplicarea soluțiilor de conducere fuzzy pentru reglarea debitului de apă (în cazul cazanelor cu circulație naturală) [10].

Reglarea nivelului în tambur este o problemă dificilă, una din soluțiile moderne adoptate fiind denumită "sistem de trei impulsuri". Nivelul se prelucrează într-un controler de tip P, iar diferența dintre debitul de abur și cel al apei de alimentare, într-un al doilea controler de tip PI. Mărimea de referință a controlerului PI este dată de semnalul din controlerul P. Soluția de reglaj fuzzy se realizează prin înlocuirea controlerelor existente cu controlerul fuzzy de tip P și PI.

Soluția fuzzy asigură creșterea siguranței în funcționare, creșterea disponibilităților, reducerea timpilor de porniri-opriri precum și reducerea costurilor.

4. Aplicații ale teoriei fuzzy în planificarea distribuției de energie

În cadrul sistemului energetic, distribuția de energie electrică absoarbe majoritatea resurselor financiare și umane. Planificarea și operarea distribuției de energie electrică este un element crucial în creșterea eficienței și a siguranței sistemului energetic. Una dintre soluții urmărește tratarea problemei planificării distribuției prin MOP-MILP (Multi-Objective and Mixed Integer Linear Programming Problem) [7]. Se consideră două abordări bazate pe logica fuzzy, care iau în considerare incertitudinile din cadrul sistemului.

Prima abordare se bazează pe agregarea funcțiilor de apartenență, definite pentru obiective (costuri operationale, investiții, siguranța sistemului, impactul asupra mediului etc) și constrângeri, pentru a forma o funcție de apartenență a deciziei. În cea de a doua abordare, coeficienții obiectivelor și ai constrângerilor sunt reprezentați prin numere fuzzy.

Se poate utiliza de, asemenea, o strategie euristică, în care incertitudinile sunt încorporate în model, prin reprezentarea parametrilor problemei ca numere fuzzy. Un indice de agregare specific translatează structura propusă de inginerul

proiectant, ținând cont de diferite obiective, unde importanța obiectivelor poate fi exprimată prin variabile lingvistice. Selecția alternativelor de extindere, precum și satisfacerea constrângerilor, este evaluată prin compararea numerelor fuzzy.

Această abordare s-a dovedit a fi foarte eficientă în aplicații practice și poate cu ușurință modela diferite obiective, constrângeri și incertitudini.

5. Abordare fuzzy în managementul echipamentelor de rezervă

Managementul echipamentelor de rezervă constituie un aspect important al producției de energie electrică. Acesta trebuie să ia în considerare două aspecte importante: reducerea costurilor de întreținere și creșterea sau menținerea disponibilității echipamentelor. Un aspect important este timpul de defect, care depinde de diferiți factori, cum ar fi posibilitatea de depanare a sistemului, timpul de reparare, disponibilitatea celui care efectuează reparația și timpul de livrare a componentelor noi dacă este cazul. Când apare un defect și există o rezervă în stoc, timpul de defect în sistem este minimizat. În cazul în care nu există rezerva în stoc, acestui interval de timp t se adaugă timpul de livrare. Stocul echipamentelor de rezervă trebuie evaluat pe baza următoarelor considerente: rata de defect, cost, timp de livrare, posibilitatea de reparare, timp de reparare. Managementul rezervelor este, în acest sens, o problemă de optimizare.

Se poate aplica o metodologie fuzzy, în cazul incertitudinii asupra datelor în procesul de optimizare a stocului echipamentelor de rezervă [2]. Datele necunoscute pot fi aproximate de experți. Aceștia exprimă nivelurile de încredere, asociate datelor estimate, utilizând expresii lingvistice. Abordarea constă din trei aspecte: determinarea nivelurilor de încredere, determinarea mecanismului de agregare fuzzy și interpretarea efectului incertitudinilor în funcția obiectiv.

Într-o primă variantă, datele cărora li se asociază niveluri de încredere în intervalul $[0,1]$ sunt supuse agregării înaintea procesului de optimizare, datelor modificate urmând să li se aplice o metodă optimală de alocare a resurselor pentru stabilirea unei politici finale. O altă opțiune este aceea de a genera un proces de optimizare, în care datele nemodificate și nivelurile de încredere sunt procesate separat, conducând la stabilirea politicilor după optimizare, în procesul de agregare.

Metoda propusă preîntâmpina dificultățile în optimizare, în cazul incertitudinii asupra datelor.

6. Concluzii

Scopul lucrării este acela de a prezenta, într-un cadru unitar, diferite aplicații pe care autorii le consideră reprezentative pentru implementarea tehnologiei fuzzy în energetică. Din consultarea bibliografică a celor mai recente studii în domeniul sistemelor fuzzy, se constată succesul unui mare număr de aplicații în energetică.

Lucrarea prezintă eforturile autorilor de a integra algoritmi fuzzy în conducerea, planificarea și managementul sistemelor energetice. Sistemele bazate pe logica fuzzy, având capacități deosebite în medii cu informație incompletă și imprecizii, dovedesc un mare potențial aplicativ în sistemul energetic.

Bibliografie

1. **DUMITRACHE I., G. CALCEV, P. TETA, C. BUIU, R. CONSTANTINESCU:** Tehnici de conducere inteligentă a proceselor, Editura UPB, 1993.
2. **SUGIANTO, L.F., W. MIELCZARSKI:** Dynamic Programming Application to Optimize Spare Parts Inventory'. În: Control and Cybernetics, 1997, p. 12.
3. **DRIANKOV, D., H. HELLENDORRN, M. REINFRANK:** An Introduction to Fuzzy Control, Springer Verlag, 1993.
4. **LOFTI A. ZADEH:** The Fuzzy Systems Handbook, Earl Cox, 1994.
5. **NEGOIȚĂ, C.V., D.A. RALESCU:** Mulțimi vagi și aplicațiile lor, Editura tehnică, București, 1974.
6. **RUBIO F.R., M. BERENGUEL, E.F. CAMACHO:** Fuzzy Logic Control of a Solar Power Plant. În: IEEE Trans. On Fuzzy Systems, 3(4), 1995.
7. **KAGAN, N., C. B. OLIVEIRA:** A Fuzzy Constrained Decision Planning Tool to Model Uncertainties as Multiobjective Configuration Problems. În: Proc. Of the ISAP'96 – International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, Orlando, Florida, USA, 1996.
8. **STĂNCIULESCU, FL.:** A Hibrid Control System Using a Fuzzy Knowledge-Based Controller and its Application to Control a Complex System. În: Proc. of the European Control Conference, ECC'99, Karlsruhe, 31 August – 3 Septembrie, 1999.
9. **SUGENO, M.:** Industrial Applications of Fuzzy Control, Siemens A.G., Erlangen, 1992.
10. **ONCESCU, M., N. DANILĂ:** Considerații privind implementarea sistemelor de reglare fuzzy cu particularizări în termoelectrică, A XXV-a Conferința pe țară de termoelectrică și termoficare, Brașov, 1998.