

**CONTRIBUȚII LA MODELAREA ȘI OPTIMIZAREA SISTEMELOR DE
CONDUCERE FUZZY**

**CONTRIBUTIONS TO MODELING AND OPTIMIZATION OF
FUZZY CONTROL SYSTEMS**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Ing. Radu-Codruț DAVID

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

PROF. DR. ING. Radu-Emil PRECUP

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA

DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ ȘI INFORMATICĂ APLICATĂ

TIMIȘOARA, 2015

CUPRINS

1. MOTIVAȚIA CERCETĂRII	3
2. PUNEREA PROBLEMEI PRIVIND ACORDAREA OPTIMALĂ A PARAMETRILOR REGULATOARELOR FUZZY CU SENSIBILITATE PARAMETRICĂ REDUSĂ	6
3. ALGORITMI INSPIRAȚI DIN NATURĂ PENTRU ACORDAREA OPTIMALĂ A PARAMETRILOR REGULATOARELOR FUZZY CU SENSIBILITATE PARAMETRICĂ REDUSĂ	14
4. ACORDAREA OPTIMALĂ A PARAMETRILOR FUNCȚIILOR DE APARTENENȚĂ DE INTRARE A MODELELOR FUZZY TAKAGI-SUGENO BAZATĂ PE ALGORITMUL SIMULATED ANNEALING	21
5. CONTRIBUȚII, DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE ȘI DISEMINAREA REZULTATELOR	27
6. BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	32

1. MOTIVAȚIA CERCETĂRII

Una din variantele sistematice de îndeplinire a specificațiilor de performanță aferente sistemelor de conducere fuzzy (în particular, sistemelor de reglare fuzzy) implică acordarea parametrilor reguletoarelor sau modelelor fuzzy cu ajutorul problemelor de optimizare definite corespunzător astfel încât variabilele acestor probleme sunt parametrii de acordare. Specificațiile de performanță sunt îndeplinite prin rezolvarea acestor probleme de optimizare care asigură acordarea optimă a parametrilor reguletoarelor și modelelor fuzzy. Acest proces poate conduce la probleme de optimizare multiobiectiv datorită complexității proceselor, structurii și neliniarităților reguletoarelor, care determină posibilitatea ca funcțiile obiectiv asociate problemelor de optimizare să fie neconvexe sau nediferențiable.

Pentru sistemele de reglare automată, indicatorii de performanță sunt exprimați de regulă ca indicatori empirici aferenți acestor sisteme (de exemplu, suprareglaj, timp de reglare, rezervă de fază, etc.). Una din abordările des întâlnite, pentru asigurarea îndeplinirii specificațiilor de performanță impuse/dorite ale sistemelor de conducere fuzzy (și ale sistemelor de reglare fuzzy), este definirea acestor specificații prin intermediul unor probleme de optimizare bazate pe funcții obiectiv, care folosesc ca variabile parametrii de acordare ai reguletoarelor și sunt supuse unor restricții necesare formulate în manieră adecvată. Valorile optime ale parametrilor de acordare ai reguletoarelor sunt obținute prin rezolvarea acestor probleme de optimizare, care, în majoritatea cazurilor, urmărește minimizarea funcțiilor obiectiv și conduce la parametrii optimi. În cadrul acestei teze este abordată acordarea optimă a parametrilor reguletoarelor fuzzy în contextul descris anterior ca variantă sistematică de proiectare și acordare a parametrilor acestor reguletoare neliniare.

Pentru modelarea și acordarea parametrilor sistemelor de reglare optime, sunt folosite de regulă modele liniare sau liniarizate ale proceselor conduse. Însă procesele industriale sunt supuse variațiilor parametrice ale proceselor conduse, care pot determina sistemele să intre în stări nedorite sau chiar instabile. Pentru a evita aceste situații, este necesară o analiză a sensibilității în raport cu variațiile parametrilor proceselor conduse, iar în acest context sunt deduse modele de sensibilitate de stare în raport cu parametrii variabili ai acestor procese. Parametrii sunt considerați variabili dacă modelele inițiale ale proceselor sunt neliniare și apoi liniarizate în vecinătatea unor puncte de funcționare pentru a asigura proiectarea și acordarea parametrilor reguletoarelor în manieră relativ facilă și ușor de înțeles. Funcțiile obiectiv considerate în cadrul acestei teze includ funcțiile de sensibilitate a ieșirii în modelele de sensibilitate asociate, astfel că sunt obținute reguletoare optime cu sensibilitate parametrică redusă deoarece sunt definite probleme de optimizare ce implică minimizarea acestor funcții obiectiv.

Rezolvarea problemelor de optimizare specifice acordării optime a parametrilor reguletoarelor fuzzy este o sarcină complicată datorită expresiilor complexe ale funcțiilor obiectiv și riscului de blocaj în puncte de minim local. Aceasta problemă depinde de proces și de structura reguletoarelor fuzzy și a fost abordată, de exemplu, în [Fen06], [Prei06], [Oh11], [Pre11a], [Bla13], [Moh14]. Algoritmi inspirați din natură pot fi folosiți cu succes în rezolvarea acestor probleme de optimizare datorită evitării calculului derivatelor, care conduce la reducerea costurilor de implementare. Celelalte avantaje ale utilizării algoritmilor inspirați din natură în rezolvarea acestor probleme de optimizare sunt transparența în proiectare, oferirea unor soluții de proiectare și implementare de tip low-cost automation și înlocuirea informației de gradient de valoarea efectivă calculată / evaluată a funcției obiectiv.

Primul obiectiv al cercetărilor efectuate în cadrul acestei teze este acordarea optimă a parametrilor reguletoarelor fuzzy prin folosirea algoritmilor inspirați din natură. Problemele de optimizare sunt definite astfel încât să includă funcții obiectiv care asigură reducerea sensibilității în raport cu variațiile parametrilor proceselor conduse.

Problema modelării fuzzy prin folosirea modelelor fuzzy de tip Takagi-Sugeno (T-S) a fost abordată recent în literatura de specialitate. Din cadrul aplicațiilor sugestive analizate în cadrul tezei sunt exemplificate următoarele: modele fuzzy T-S pentru lagărele magnetice din cadrul motoarelor de mare viteză [Wan10], un model fuzzy T-S aferent procesului de decelerare a autovehiculelor prin analiza procesului de frânare și modelului dinamic al comportamentului roții și vehiculului [Zhe11], estimarea temperaturii utilizând o rețea neuronală fuzzy care conține senzori inteligenți [Yon11], modele fuzzy de tip T-S în timp discret a sistemelor anti-blocaj al roților (ABS) [Pre12c].

O calitate foarte bună a modelelor fuzzy de tip T-S este necesară atât pentru modelarea fuzzy, pentru descrierea dinamicii și neliniarităților proceselor dinamice, cât și pentru obținerea modelelor matematice simplificate care sunt utile în proiectarea bazată pe model (model-based design) a reguletoarelor fuzzy. Odată ce modelele fuzzy sunt obținute, în literatură sunt prezentate mai multe abordări pentru îmbunătățirea calității (în speță, performanțelor) acestora prin acordarea

optimală a parametrilor acestor modele, pe baza definirii adecvate a problemelor de optimizare care urmăresc minimizarea funcțiilor obiectiv pentru a reduce cât de mult posibil erorile de modelare.

Luând în considerare structura modelelor fuzzy, pot fi acordați optimal diverși parametri ai fiecăruia dintre aceste module: parametri din modulul de fuzzificare, parametri din mecanismul de inferență (incluzând baza de reguli și premisele regulilor modelelor fuzzy de tip T-S) și parametri din modulul de defuzificare. Unele din aplicațiile sugestive de acordare optimală a parametrilor modelelor fuzzy sunt axate pe: acordarea optimală a bazei de reguli și parametrilor mecanismului de inferență [Bod05], optimizarea bazei de reguli fuzzy [Cab06], acordarea parametrilor premizelor și concluziilor regulilor modelelor fuzzy de tip T-S [Alm10], reducerea bazei de reguli și mecanismului de inferență din cadrul regulatoarelor fuzzy [Pir13].

Al doilea obiectiv al cercetărilor efectuate în cadrul acestei teze este acordarea optimală a parametrilor funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelelor fuzzy dinamice ale proceselor folosind algoritmi inspirați din natură. Problemele de optimizare sunt definite astfel încât să includă funcții obiectiv care asigură reducerea erorilor de modelare urmărind minimizarea funcțiilor obiectiv. Teza este axată pe acordarea optimală a unor parametri ai funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelelor fuzzy de tip T-S.

Cele mai recente soluții pentru rezolvarea problemelor de optimizare care realizează acordare optimală a parametrilor regulatoarelor fuzzy și modelelor fuzzy sunt dezvoltate pe baza algoritmilor de optimizare inspirați din natură ce includ Călirea Simulată (SA) [Pre11c], [Pre12b], Particle Swarm Optimization (PSO) [Oh11], [Pre13a], Gravitational Search Algorithms (GSAs) [Dav13], [Pre13b], Charged System Search (CSS) algorithms [Pre14c], genetic algorithms [Oni12], Ant Colony Optimization [Cha12]. Aceste soluții sunt înglobate în ambele obiective ale tezei.

Structura tezei este compusă din cinci capitole. Pentru simplitate, în cadrul acestui rezumat au fost reținute numerotările ecuațiilor, tabelor și graficelor folosite în teză precum și abrevierile păstrate în varianta din limba engleză. În continuare este prezentată o scurtă descriere a acestor capitole.

Capitolul 1 conține în prima parte o introducere în care este prezentată motivația cercetării. De asemenea, în acest capitol sunt introduse cele două obiectivele ale cercetării urmărite în cadrul acestei teze: acordarea optimală a parametrilor regulatoarelor fuzzy prin folosirea algoritmilor inspirați din natură și acordarea optimală a parametrilor funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelelor fuzzy dinamice ale proceselor folosind algoritmi inspirați din natură. În cea de-a doua parte a acestui capitol este discutată structura tezei.

În **capitolul 2** este introdusă, pentru început, o metodă de proiectare și acordare pentru regulatoare fuzzy proporțional-integratoare (fuzzy-PI) de tip T-S pentru servosisteme neliniare cu sensibilitate parametrică redusă. Clasa de servosisteme neliniare este structurată ca o conexiune serie de elemente liniare de ordinul doi cu dinamică și componentă integratoare, cu neliniaritate statică de tip saturație și zonă moartă plasată pe intrarea procesului.

Metoda de proiectare asigură acordarea parametrilor regulatoarelor fuzzy prin rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare, care constituie primul obiectiv al acestei teze, folosind algoritmi de optimizare inspirați din natură. Sunt definite problemele de optimizare împreună cu funcțiile obiectiv corespunzătoare și restricțiile impuse variabilelor.

În cea de-a doua parte a capitolului este pusă în evidență motivația folosirii algoritmilor inspirați din natură în rezolvarea problemelor de optimizare aferente metodei de proiectare. Motivația este susținută de o cercetare bibliografică a literaturii recente de specialitate.

Capitolul este încheiat prin menționarea principalelor contribuții revendicate de autor, susținute de lucrările publicate și indexările în baze de date internaționale aferente acestora.

În **capitolul 3** sunt propuse soluții bazate pe algoritmi inspirați din natură folosite în rezolvarea problemelor de optimizare definite în cadrul capitolului anterior. Din cei șapte algoritmi folosiți, patru sunt variante standard ale Simulated Annealing (călirii simulate), Particle Swarm Optimization, Gravitational Search Algorithms și Charged System Search, unul din algoritmi este o variantă hibridizată bazată pe Particle Swarm Optimization și Gravitational Search Algorithm, iar ultimii doi sunt versiuni adaptive ale algoritmilor Gravitational Search Algorithms și Charged System Search, care folosesc modificări ale parametrilor bazate pe un model de învățare. Cei șapte algoritmi inspirați din natură sunt implementați în cadrul pasului 4 al metodei de proiectare dedicată regulatoarelor fuzzy-PI de tip T-S descrisă în capitolul 2.

Rezultatele aferente fiecărei probleme de optimizare sunt obținute în urma mai multor rulări ale algoritmilor și sunt prezentate împreună cu valorile optime ale parametrilor regulatoarelor și cu valorile minime ale funcțiilor obiectiv. Pentru validarea metodei propuse sunt prezentate atât rezultate de simulare cât și rezultate experimentale, cu exemple pentru fiecare soluție bazată pe algoritmi inspirați din natură. Procesul de căutare este descris pentru fiecare soluție propusă printr-un set de grafice în care este prezentată evoluția agenților de explorare.

Calitatea rezultatelor obținute este apoi evaluată pe baza a trei indicatori originali de performanță (calitate). Acești indicatori măsoară și evaluează convergența soluțiilor prin monitorizarea valorilor medii ale funcțiilor obiectiv pentru un număr de rulări, numărul mediu de iterații necesare pentru ilustrarea vitezei de convergență, respectiv precizia soluției.

În finalul capitolului sunt puse în evidență noile contribuții, care sunt consemnate împreună cu lucrările publicate care le sprijină și indexările acestor lucrări în baze de date internaționale.

Capitolul 4 este dedicat rezolvării a două probleme de acordare optimală a unor parametri ai funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelelor fuzzy T-S obținute prin aplicarea principiului echivalenței modale. Modelele fuzzy T-S sunt aplicate pe două echipamente de laborator: un sistem anti-blocaj al roților și un sistem cu levitație magnetică. Abordarea de modelare propusă în cadrul acestui capitol folosește algoritmul Simulated Annealing pentru optimizarea parametrilor modelelor fuzzy T-S.

Abordarea de modelare propusă se diferențiază de alte abordări prin faptul că pornește de la modelul matematic primar al procesului și oferă un avantaj prin verificarea performanțelor modelelor fuzzy T-S optime folosind experimente în timp real pe cele două echipamente de laborator. Un alt aspect important al abordării de modelare propuse este aplicabilitatea acesteia unei game largi de procese industriale prin generalizări adecvate cu grad de complexitate relativ redus.

Deși prin această abordare de modelare nu poate fi garantată atingerea minimului global al funcției obiectiv, este observată o reducere considerabilă a valorilor acestor funcții obiectiv pe parcursul experimentelor. Se indică, astfel, o îmbunătățire clară a performanțelor oferite prin modelele fuzzy optime de tip T-S.

În final sunt prezentate noile contribuții extrase din rezultatele de cercetare oferite în cadrul acestui capitol, împreună cu lucrările publicate care le susțin și indexările acestor lucrări în baze de date internaționale.

Capitolul 5 este structurat în trei subcapitole. În primul subcapitol sunt sintetizate concluziile capitolelor anterioare. În cel de-al doilea subcapitol sunt prezentate direcțiile viitoare de cercetare. Cel de-al treilea subcapitol este dedicat diseminării rezultatelor cercetării, prin prezentarea acestora sub forma unei liste de publicații, împreună cu factorii de impact și indexările în baze de date internaționale și prin menționarea citărilor independente ale acestor lucrări împreună cu factorii de impact.

2. PUNEREA PROBLEMEI PRIVIND ACORDAREA OPTIMALĂ A PARAMETRILOR REGULATOARELOR FUZZY CU SENSIBILITATE PARAMETRICĂ REDUSĂ

Structura sistemului de reglare fuzzy este prezentată în fig. 2.1 sub forma unui sistem de reglare automată convențională (buclă de reglare) cu regulator fuzzy cu filtru de referință dedus din [Pre09a], în care FC este regulatorul fuzzy (fuzzy controller), P este procesul condus, F este filtrul de referință, r este referința, r_1 este referința filtrată, d este perturbația, y este ieșirea reglată, u este comanda, e este eroarea de reglare:

$$e = r_1 - y, \quad (2.1)$$

$\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{m_p}]^T \in \mathbf{R}^{m_p}$ este vectorul parametrilor procesului cu elementele α_τ , $\tau = 1 \dots m_p$, care reprezintă parametrii procesului, $\rho = [\rho_1 \ \rho_2 \ \dots \ \rho_q]^T \in \mathbf{R}^q$ este vectorul parametrilor regulatorului cu elementele ρ_γ , $\gamma = 1 \dots q$, care sunt parametrii de acordare ai regulatorului, parametrii filtrului pot fi incluși în acest vector după cum este indicat în fig. 2.1 și indicele superior T indică transpusa matricei. Structura de reglare fuzzy prezentată în fig. 2.1 aparține structurilor de reglare cu două grade de libertate (2-DOF).

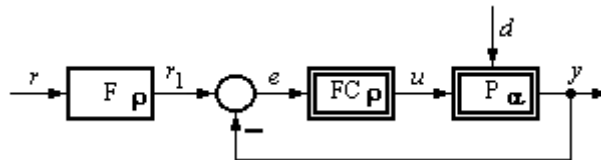


Fig. 2.1. Structura sistemului de reglare fuzzy.

După cum este arătat în [Ara03], [Vis04], [Vra11], [Iwa12], [Kan12], [Pel12], [Sza12], [Vil12], [Kum13], structurile de reglare 2-DOF (cu regulatoare de tip PI și PID) au avantajul unor performanțe mai bune comparativ cu sistemele de reglare cu un singur grad de libertate (1-DOF) în raport cu referința și cu perturbațiile. Cea mai importantă limitare a regulatoarelor liniare 2-DOF este faptul că reducerea suprareglajului este compensată printr-un timp de reglare mai mare în răspunsurile sistemului la modificările referinței. Introducerea logicii fuzzy în structura sistemelor de reglare 2-DOF conduce la o performanță îmbunătățită ale sistemelor de reglare automată; unele rezultate foarte bune în diverse aplicații sunt prezentate în [Pre09a], [Prei10], [Dra11a], [Pre11a] [Liu12], [Sil12], [Sti12b], [Pre13a].

În cadrul acestei teze va fi considerat un filtru de referință F ferm (crisp). Acest filtru poate fi considerat, de asemenea, ca un bloc cu logică fuzzy ce va fi modelat și acordat optimal, dar aceasta reprezintă o direcție viitoare de cercetare. În fig. 2.1 sunt ilustrate: filtrul de referință F liniar, regulatorul fuzzy FC ca un sistem neliniar și procesul neliniar P.

Procesul condus este descris printr-un model de stare cu timp discret monovariabil la intrare și ieșire (SISO) [Pre13a]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_P(t_d + 1) &= \mathbf{f}_{Pd}(\mathbf{x}_P(t_d), \mathbf{u}, d(t_d)), \\ y(t_d) &= g_{Pd}(\mathbf{x}_P(t_d), \mathbf{u}, d(t_d)), \\ \mathbf{x}_P(t_{d0}) &= \mathbf{x}_{P0}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

în care $t_{d0} \in \mathbf{N}$ este momentul de timp inițial, $t_d, t_d \in \mathbf{N}$, $t_d \geq t_{d0}$, este argumentul de timp discret, $\mathbf{x}_P = [x_{P,1} \ x_{P,2} \ \dots \ x_{P,n}]^T \in \mathbf{R}^n$ este vectorul de stare aferent procesului, $\mathbf{x}_{P0} \in \mathbf{R}^n$ este vectorul inițial de stare aferent procesului și funcțiile $\mathbf{f}_{Pd} : \mathbf{R}^{n+m_p+2} \rightarrow \mathbf{R}^n$ și $g_{Pd} : \mathbf{R}^{n+m_p+1} \rightarrow \mathbf{R}$ sunt derivabile în raport cu parametrul α_τ , $\tau = 1 \dots m_p$. Modelul de stare prezentat în (2.2) este un model neliniar fără conexiune directă de la intrare la ieșire și poate fi obținut, prin discretizare, dintr-un model de stare SISO cu timp continuu acceptând că intrările u și d sunt constante pe intervalele de eșantionare și prezența extrapolatorului de ordin zero (zero-order hold, ZOH).

Filtrul de referință este descris prin următorul model de stare cu timp discret, care poate fi dedus, de asemenea, din modelul de stare SISO cu timp continuu:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_F(t_d + 1) &= \mathbf{f}_{Fd}(\mathbf{x}_F(t_d), \rho, r(t_d)), \\ r_1(t_d) &= g_{Fd}(\mathbf{x}_F(t_d), \rho, r(t_d)), \\ \mathbf{x}_F(t_{d0}) &= \mathbf{x}_{F0}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

în care $\mathbf{x}_F = [x_{F,1} \ x_{F,2} \ \dots \ x_{F,n_F}]^T \in \mathbf{R}^{n_F}$ este vectorul de stare aferent filtrului de referință și $\mathbf{x}_{F0} \in \mathbf{R}^{n_F}$ este vectorul de stare inițial aferent filtrului de referință. Funcțiile $\mathbf{f}_{Fd} : \mathbf{R}^{n_F+q+1} \rightarrow \mathbf{R}^{n_F}$ și $g_{Fd} : \mathbf{R}^{n_F+q+1} \rightarrow \mathbf{R}$ contribuie la asigurarea derivabilității modelului de stare al sistemului de reglare fuzzy în raport cu parametrul $\alpha_\tau, \tau = 1 \dots m_P$.

Regulatorul fuzzy este caracterizat prin modelul de stare SISO cu timp discret:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_C(t_d + 1) &= \mathbf{f}_{Cd}(\mathbf{x}_C(t_d), \boldsymbol{\rho}, e(t)), \\ u(t_d) &= g_{Cd}(\mathbf{x}_C(t_d), \boldsymbol{\rho}, e(t_d)), \\ \mathbf{x}_C(t_{d0}) &= \mathbf{x}_{C0}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

în care $\mathbf{x}_C = [x_{C,1} \ x_{C,2} \ \dots \ x_{C,n_C}]^T \in \mathbf{R}^{n_C}$ este vectorul de stare aferent regulatorului, $\mathbf{x}_{C0} \in \mathbf{R}^{n_C}$ este vectorul inițial de stare aferent regulatorului. Funcțiile $\mathbf{f}_{Cd} : \mathbf{R}^{n_C+q+1} \rightarrow \mathbf{R}^{n_C}$ și $g_{Cd} : \mathbf{R}^{n_C+q+1} \rightarrow \mathbf{R}$ din modelul (2.4) contribuie la asigurarea derivabilității modelului de stare al sistemului de reglare fuzzy în raport cu parametrul $\alpha_\tau, \tau = 1 \dots m_P$. În plus, convergența funcțiilor obiectiv necesită ca regulatorul să aibă o componentă integratoare pentru a asigura valoarea nulă a erorii de reglare e în regim staționar constant pentru anumite tipuri de intrări de referință și perturbație.

Vectorul de stare aferent procesului \mathbf{x}_P , vectorul de stare aferent regulatorului \mathbf{x}_C și vectorul de stare aferent filtrului de referință \mathbf{x}_F sunt grupați în vectorul de stare aferent sistemului de reglare \mathbf{x} :

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_P \\ \mathbf{x}_C \\ \mathbf{x}_F \end{bmatrix} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n+n_C+n_F}]^T \in \mathbf{R}^{n+n_C+n_F}, \\ x_\nu &= \begin{cases} x_{P,\nu}, & \text{if } \nu = 1 \dots n, \\ x_{C,\nu-n}, & \text{if } \nu = n+1 \dots n+n_C, \\ x_{F,\nu-n-n_C}, & \text{if } \nu = n+n_C+1 \dots n+n_C+n_F, \end{cases} \quad \nu = 1 \dots n+n_C+n_F. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Modelele de stare (2.2) – (2.4) sunt grupate folosind relațiile (2.1) și (2.5). Rezultă următorul model de stare cu timp discret aferent sistemului de reglare fuzzy:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t_d + 1) &= \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{Pd}(\mathbf{x}_P(t_d), \boldsymbol{\alpha}, g_{Cd}(\mathbf{x}_C(t_d), \boldsymbol{\rho}, g_{Fd}[\mathbf{x}_F(t_d), \boldsymbol{\rho}, r(t_d)] - g_{Pd}[\mathbf{x}_P(t_d), \boldsymbol{\alpha}, d(t_d)]), d(t_d)) \\ \mathbf{f}_{Cd}(\mathbf{x}_C(t_d), \boldsymbol{\rho}, g_{Fd}[\mathbf{x}_F(t_d), \boldsymbol{\rho}, r(t_d)] - g_{Pd}[\mathbf{x}_P(t_d), \boldsymbol{\alpha}, d(t_d)]) \\ \mathbf{f}_{Fd}(\mathbf{x}_F(t_d), \boldsymbol{\rho}, r(t_d)) \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{f}_d(\mathbf{x}(t_d), \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\rho}, r(t_d), d(t_d)) = [f_1(t_d) \ f_2(t_d) \ \dots \ f_{n+n_C+n_F}(t_d)]^T, \\ y(t_d) &= g_{Pd}(\mathbf{x}_P(t_d), \boldsymbol{\alpha}, d(t_d)) = h_{Pd}(\mathbf{x}(t_d), \boldsymbol{\alpha}, d(t_d)), \\ \mathbf{x}(t_{d0}) &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{P0} \\ \mathbf{x}_{C0} \\ \mathbf{x}_{F0} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

în care funcțiile $\mathbf{f}_d : \mathbf{R}^{n+n_C+n_F+m_P+q+2} \rightarrow \mathbf{R}^{n+n_C+n_F}$ și $h_{Pd} : \mathbf{R}^{n+n_C+n_F+m_P+1} \rightarrow \mathbf{R}$ sunt derivabile în raport cu parametrul $\alpha_\tau, \tau = 1 \dots m_P$.

Funcțiile de sensibilitate a stărilor $\lambda_{\alpha_\tau, \nu}, \nu = 1 \dots n+n_C+n_F$ și funcția de sensibilitate a ieșirii σ_{α_τ} în raport cu parametrul $\alpha_\tau, \tau = 1 \dots m_P$, sunt definite după cum urmează [Ros00]:

$$\lambda_{\alpha_\tau, \nu} = \left[\frac{\partial x_\nu}{\partial \alpha_\tau} \right]_{\alpha_\tau, 0}, \quad \sigma_{\alpha_\tau} = \left[\frac{\partial y}{\partial \alpha_\tau} \right]_{\alpha_\tau, 0}, \quad \nu = 1 \dots n+n_C+n_F, \quad \tau = 1 \dots m_P, \quad (2.7)$$

în care indicele inferior 0 indică valoarea nominală a parametrului procesului $\alpha_\tau, \tau = 1 \dots m_P$, ce este supus variațiilor. Aceste variații justifică reducerea sensibilității și acordarea parametrilor regloatoarelor fuzzy cu sensibilitate parametrică redusă.

Folosind relațiile (2.7) pentru a calcula derivatele parțiale ale variabilelor din modelul (2.6), modelele de sensibilitate ale sistemului de reglare fuzzy în raport cu parametrul procesului $\alpha_\tau, \tau = 1 \dots m_P$ obțin expresiile:

$$\begin{aligned}
\lambda_{\alpha_\tau, \nu}(t_d + 1) &= \sum_{\nu=1}^{n+n_C+n_F} \left\{ \left[\frac{\partial f_\nu(t_d)}{\partial x_\nu} \right]_{\alpha_\tau, 0} \lambda_{\alpha_\tau, \nu}(t_d) \right\} + \left[\frac{\partial f_\nu(t_d)}{\partial \alpha_\tau} \right]_{\alpha_\tau, 0}, \\
\sigma_{\alpha_\tau}(t_d) &= \sum_{\nu=1}^n \left\{ \left[\frac{\partial h_{Pd}(t_d)}{\partial x_\nu} \right]_{\alpha_\tau, 0} \lambda_{\alpha_\tau, \nu}(t_d) \right\} + \left[\frac{\partial h_{Pd}(t_d)}{\partial \alpha_\tau} \right]_{\alpha_\tau, 0}, \\
\lambda_{\alpha_\tau, \nu}(t_{d0}) &= 0, \nu = 1 \dots n + n_C + n_F, \tau = 1 \dots m_P.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Valorile inițiale ale variabilelor de stare sunt importante în analiza modelelor de sensibilitate prezentate în relația (2.8).

Pentru a asigura reducerea sensibilității în raport cu modificările parametrului $\alpha_\tau, \tau = 1 \dots m_P$, sunt definite următoarele funcții obiectiv în timp discret:

$$J_{1, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{t_d=0}^{\infty} \{e^2(t_d, \boldsymbol{\rho}) + (\gamma_{\alpha_\tau})^2 [\sigma_{\alpha_\tau}(t_d, \boldsymbol{\rho})]^2\}, \tau = 1 \dots m_P, \tag{2.9}$$

$$J_{2, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{t_d=0}^{\infty} \{|e(t_d, \boldsymbol{\rho})| + (\gamma_{\alpha_\tau})^2 [\sigma_{\alpha_\tau}(t_d, \boldsymbol{\rho})]^2\}, \tau = 1 \dots m_P, \tag{2.10}$$

$$J_{3, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{t_d=0}^{\infty} \{t_d e^2(t_d, \boldsymbol{\rho}) + (\gamma_{\alpha_\tau})^2 [\sigma_{\alpha_\tau}(t_d, \boldsymbol{\rho})]^2\}, \tau = 1 \dots m_P, \tag{2.11}$$

$$J_{4, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{t_d=0}^{\infty} \{t_d |e(t_d, \boldsymbol{\rho})| + (\gamma_{\alpha_\tau})^2 [\sigma_{\alpha_\tau}(t_d, \boldsymbol{\rho})]^2\}, \tau = 1 \dots m_P, \tag{2.12}$$

în care $\gamma_{\alpha_\tau}, \tau = 1 \dots m_P$, este parametrul de ponderare. Funcția obiectiv $J_{1, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho})$ este definită ca suma pătratelor erorilor de reglare și pătratelor funcției de sensibilitate a ieșirii, funcția obiectiv $J_{2, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho})$ este definită ca suma modulelor erorii de reglare și pătratelor funcției de sensibilitate a ieșirii, funcția obiectiv $J_{3, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho})$ este definită ca suma pătratelor erorilor de reglare înmulțite cu timpul și pătratelor funcției de sensibilitate a ieșirii și funcția obiectiv $J_{4, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho})$ este definită ca suma modulelor erorii de reglare înmulțite cu timpul și pătratelor funcției de sensibilitate a ieșirii, toate aceste patru variante de sume fiind ponderate prin parametrul $\gamma_{\alpha_\tau}, \tau = 1 \dots m_P$. Vectorul variabilelor funcțiilor obiectiv $\boldsymbol{\rho}$ va fi omis, în continuare, pentru simplificarea notațiilor.

Convergența funcțiilor obiectiv definite în (2.9) – (2.12) necesită ca valorile de regim staționar constant ale funcțiilor din membrul drept să fie nule. Întrucât valorile nule de regim staționar constant ale ale erorii de reglare e pentru unele tipuri de perturbații sunt garantate de regulatoarele cu componentă integratoare, sunt, de asemenea, necesare valori nule de regim staționar constant ale funcției de sensibilitate a ieșirii σ_{α_τ} .

Minimizarea funcțiilor obiectiv definite în relațiile (2.9) – (2.12) urmărește reducerea sensibilității și este exprimată sub forma problemelor de optimizare:

$$\boldsymbol{\rho}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\rho} \in D_\rho} J_{1, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho}), \tau = 1 \dots m_P, \tag{2.13}$$

$$\boldsymbol{\rho}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\rho} \in D_\rho} J_{2, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho}), \tau = 1 \dots m_P, \tag{2.14}$$

$$\boldsymbol{\rho}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\rho} \in D_\rho} J_{3, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho}), \tau = 1 \dots m_P, \tag{2.15}$$

$$\boldsymbol{\rho}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\rho} \in D_\rho} J_{4, \alpha_\tau}(\boldsymbol{\rho}), \tau = 1 \dots m_P \tag{2.16}$$

în care $\boldsymbol{\rho}^*$ este vectorul parametrilor optimali ai regulatorului, adică valoarea optimală a vectorului $\boldsymbol{\rho}$ și D_ρ este domeniul admisibil (fezabil) al lui $\boldsymbol{\rho}$. În domeniul D_ρ pot fi impuse diverse restricții inclusiv cele legate de stabilitatea sistemului de reglare fuzzy. Astfel de restricții pot fi exprimate sub forma unor condiții de stabilitate care pot fi deduse în general pentru sisteme neliniare [Pas04], [Dan05], [Pre06a], [Pre07], [Li10], [Bla11], [Vil13] sau în particular pentru sisteme de reglare fuzzy cu regulatoare de tip Mamdani [Pre97], [Sug99], [Pre06b], [Liu10b] sau cu regulatoare fuzzy de tip Takagi-Sugeno [Fen06], [Pre09c], [Pre11a], [Pre13e], [Cha14] și pot lua în considerare diverse regimuri de funcționare a sistemelor de reglare automată [Car05], [Fil08], [Fil09], [Dan11], [Wan12b], [Fer13], [Hus13], [Cor14], [Wu14].

În cadrul acestei teze au fost considerate doar funcțiile de sensibilitate a ieșirii în expresiile funcțiilor obiectiv (2.9) – (2.12). Introducerea funcțiilor de sensibilitate a stărilor în funcțiile obiectiv poate fi luată în vedere ca direcție viitoare de cercetare.

Procesul din cadrul servosistemelor este caracterizat prin următorul model de stare SISO cu timp continuu, care definește o clasă generală de servosisteme:

$$m(t) = \begin{cases} -1, & \text{if } u(t) \leq -u_b, \\ \frac{u(t)+u_c}{u_b-u_c}, & \text{if } -u_b < u(t) < -u_c, \\ 0, & \text{if } -u_c \leq u(t) \leq u_a, \\ \frac{u(t)-u_a}{u_b-u_a}, & \text{if } u_a < u(t) < u_b, \\ 1, & \text{if } u(t) \geq u_b, \end{cases}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_P(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_\Sigma} \end{bmatrix} \mathbf{x}_P(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_P}{T_\Sigma} \end{bmatrix} m(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} d(t), \quad (2.17)$$

$$y(t) = [1 \ 0] \mathbf{x}_P(t),$$

în care t este argumentul timp continuu, $t \in \mathbf{R}$, $t \geq 0$, k_P este coeficientul de transfer al procesului, T_Σ este constanta de timp mică, comanda u este un semnal de tip PWM (pulse width modulated) și m este ieșirea blocului de tip neliniaritate statică de tip saturație și zonă moartă plasată pe intrarea procesului, specific elementului de execuție. Neliniaritatea este modelată prin prima ecuație din (2.17), cu parametrii u_a , u_b și u_c , $0 < u_a < u_b$, $0 < u_c < u_b$. Modelul de stare (2.17) include dinamica elementului de execuție și elementelor de măsură. Vectorul de stare $\mathbf{x}_P(t)$ este exprimat după cum urmează în aplicații de reglare a poziției unghiulare pentru $n=2$:

$$\mathbf{x}_P(t) = [x_{P,1}(t) \ x_{P,2}(t)]^T = [\alpha(t) \ \omega(t)]^T, \quad (2.18)$$

în care $\alpha(t)$ este poziția unghiulară și $\omega(t)$ este viteza unghiulară. În fig. 2.2 este prezentată structura procesului condus.

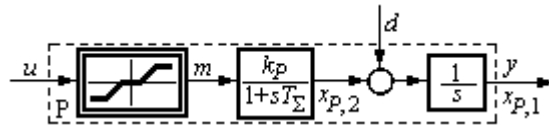


Fig. 2.2. Structura procesului condus cu neliniaritate statică de tip saturație și zonă moartă plasată pe intrare.

Neliniaritatea din (2.17) este neglijată în următorul model matematic simplificat al procesului exprimat sub forma funcției de transfer $P(s)$:

$$P(s) = \frac{k_{EP}}{s(1+T_\Sigma s)}. \quad (2.19)$$

Această funcție de transfer consideră u ca intrare și y ca ieșire. Expresia coeficientului de transfer echivalent al procesului, k_{EP} , este:

$$k_{EP} = \begin{cases} \frac{k_P}{u_b-u_c}, & \text{if } -u_b < u(t) < -u_c, \\ \frac{k_P}{u_b-u_a}, & \text{if } u_a < u(t) < u_b. \end{cases} \quad (2.20)$$

Acest parametru poate fi utilizat în modelarea și acordarea parametrilor regulatorului în două cazuri din cele cinci referitoare la neliniaritatea din (2.17).

Modelele matematice ale procesului prezentate în relațiile (2.17) și (2.19) pot fi folosite în proiectarea reguletoarelor pentru servosisteme în diverse aplicații presupunând ca parametrii k_P și T_Σ depind de punctul de funcționare. Astfel, este justificată proiectarea sistemelor de reglare automată cu sensibilitate parametrică redusă în raport cu k_P și T_Σ . În acest context, $m_P=2$, și vectorul parametrilor procesului obține următoarea expresie utilizată în proiectarea sistemelor de reglare cu sensibilitate parametrică redusă pentru această clasă de servosisteme:

$$\mathbf{a} = [\alpha_1 \ \alpha_2]^T, \quad \alpha_1 = k_P, \quad \alpha_2 = T_\Sigma. \quad (2.21)$$

După cum se arată în [Ast95], [Prei99], [Pre09a], reguletoarele PI pot conduce cu succes procesele modelate în (2.19) dacă sunt introduse în structuri de sistemelor de reglare liniare 2-DOF după cum este ilustrat în fig. 2.1 cu un regulator PI în locul blocului FC. Funcția de transfer a regulatorului PI are expresia:

$$C(s) = k_c \left(\frac{1+sT_i}{s} \right) = k_c \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right), \quad k_C = k_c T_i, \quad (2.22)$$

În care k_c este coeficientul de transfer al regulatorului și T_i este constanta de timp de integrare. Regulatele PI pot fi acordate prin metoda Extended Symmetrical Optimum (ESO) [Prei99] pentru garantarea unui compromis între specificațiile de performanță (exprimate pe baza valorilor maxime ale indicatorilor de calitate ai sistemului de reglare automată) impuse sistemului de reglare automată folosind un singur parametru de proiectare denumit β , cu valori recomandate în intervalul $1 < \beta \leq 20$. Diagramele prezentate în fig. 2.3 pot fi utilizate în alegerea unei valori a parametrului de proiectare β ; rezultă un compromis între indicatorii de calitate ai sistemului de reglare automată, în speță suprareglajul exprimat în procente σ_1 [%], timpul de reglare t_s și timpul de creștere t_r .

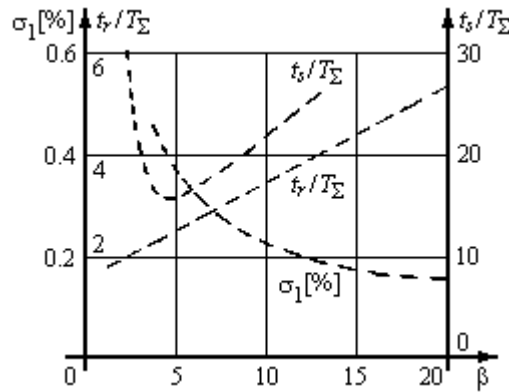


Fig. 2.3. Indicatorii de calitate ai sistemului de reglare automată în raport cu referința în funcție de parametrul de proiectare β în metoda ESO.

Relațiile de acordare a parametrilor regulatele PI prin metoda ESO sunt [Prei99]:

$$k_c = \frac{1}{\beta \sqrt{\beta} k_{EP} T_\Sigma^2}, \quad T_i = \beta T_\Sigma, \quad k_C = \frac{1}{\sqrt{\beta} k_{EP} T_\Sigma}. \quad (2.23)$$

Fig. 2.3 este importantă deoarece ambele valori posibile ale k_{EP} conform (2.20) ar trebui să fie folosite în stabilirea acelor valori ale lui β ce asigură îndeplinirea specificațiilor de performanță impuse sistemului de reglare automată. Poate fi utilizată următoarea variantă relativ simplă a filtrului de referință ce asigură îmbunătățirea performanțelor sistemului de reglare automată liniar prin anularea unui zero în funcția de transfer în buclă închisă în raport cu referința:

$$F(s) = \frac{1}{1 + \beta T_\Sigma s}. \quad (2.24)$$

Regulatele fuzzy-PI de tip Takagi-Sugeno (T-S PI-FCs) sunt proiectate pornind de la regulatele PI liniare în vederea îmbunătățirii suplimentare a indicatorilor de calitate ai sistemelor de reglare automată pentru clasa de procese neliniare modelate în relația (2.17). Structura și funcțiile de apartenență de intrare aferente unui T-S PI-FC simplu sunt prezentate în fig. 2.4, în care q^{-1} este operatorul de întârziere cu un pas (de eșantionare).

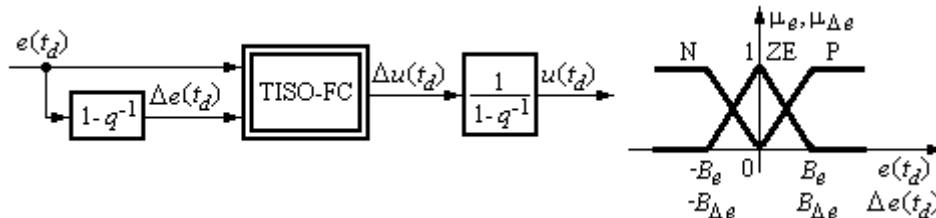


Fig. 2.4. Structura și funcțiile de apartenență de intrare aferente regulatorului fuzzy-PI de tip Takagi-Sugeno.

Fig. 2.4 ilustrează incrementul erorii de reglare $\Delta e(t_d) = e(t_d) - e(t_d - 1)$ și incrementul comenzii $\Delta u(t_d) = u(t_d) - u(t_d - 1)$. Aceste incremente oferă dinamica T-S PI-FS și rezultă din discretizarea regulatorului PI cu timp continuu. Metoda lui Tustin de discretizare conduce la forma incrementală a regulatorului PI cu timp discret:

$$\Delta u(t_d) = K_P [\Delta e(t_d) + \mu e(t_d)] \quad (2.25)$$

și la expresiile parametrilor acesteia:

$$K_P = k_c \left(T_i - \frac{T_s}{2} \right), \mu = \frac{2 T_s}{2 T_i - T_s}, \quad (2.26)$$

în care T_s este perioada de eșantionare definită conform cerințelor reglării numerice cvasi-continue [Ise89].

Blocul fuzzy cu două intrări și o ieșire (TISO-FC) prezentat în fig. 2.4 este caracterizat prin metoda mediei ponderate în modulul de defuzzificare și prin operatorii SUM și PROD în mecanismul de inferență. Baza de reguli a blocului TISO-FC este definită cu ajutorul a două funcții:

$$f_{C1}(t_d) = K_P [\Delta e(t_d) + \mu e(t_d)], f_{C2}(t_d) = \eta f_{C1}(t_d). \quad (2.27)$$

Parametrul η este introdus în relația (2.27) pentru a reduce suprareglajul sistemului de reglare fuzzy când $e(t_d)$ și $\Delta e(t_d)$ sunt de același semn. Fig. 2.4 și tabelul 2.1 pun în evidență parametrii de acordare ai acestor T-S PI-FC relativ simple: β (pentru proiectarea părții liniare a reglatoarelor), B_e , $B_{\Delta e}$ și η (pentru proiectarea părții fuzzy a reglatoarelor).

Baza de reguli prezentată în tabelul 2.1 poate fi formulată astfel încât să conțină doar două reguli deoarece utilizatorii sunt interesați în acordarea parametrilor unor T-S PI-FC simple. Simplitatea este asigurată de doar două reguli din cauza numărului redus de funcții de apartenență de intrare ilustrate în fig. 2.4, de simetria bazei de reguli și de metoda de proiectare simplă dedicată T-S PI-FC.

Tabelul 2.1. Tabelul de decizie aferent blocului TISO-FC.

$\Delta e(t)$	$e(t)$		
	N	ZE	P
P	$\Delta u(t_d) = f_{C1}(t_d)$	$\Delta u(t_d) = f_{C1}(t_d)$	$\Delta u(t_d) = f_{C2}(t_d)$
ZE	$\Delta u(t_d) = f_{C1}(t_d)$	$\Delta u(t_d) = f_{C1}(t_d)$	$\Delta u(t_d) = f_{C1}(t_d)$
N	$\Delta u(t_d) = f_{C2}(t_d)$	$\Delta u(t_d) = f_{C1}(t_d)$	$\Delta u(t_d) = f_{C1}(t_d)$

Principiul echivalenței modale [Gal95] conduce la următoarea relație de acordare, care reduce numărul parametrilor de acordare ai T-S PI-FC:

$$B_{\Delta e} = \mu B_e. \quad (2.28)$$

Prin aplicarea metodei ESO și a principiului echivalenței modale se obțin doar trei parametri de acordare ai T-S PI-FC, deci $q=3$. Acești parametri sunt incluși în vectorul parametrilor regulatorului inclus în problemele de optimizare definite în relațiile (2.13) – (2.16):

$$\mathbf{p} = [\rho_1 \quad \rho_2 \quad \rho_3]^T, \rho_1 = \beta, \rho_2 = B_e, \rho_3 = \eta. \quad (2.29)$$

Metoda de proiectare dedicată T-S PI-FC simple cu structura definită anterior constă în parcurgerea pașilor următori, care conduc la vectorul parametrilor optimali ai regulatorului \mathbf{p}^* , obținut cu ajutorul algoritmilor inspirați din natură:

Pasul 1. Este aplicată metoda ESO pentru acordarea parametrilor regulatorului PI cu timp continuu, este aleasă valoarea perioadei de eșantionare, este aplicată metoda lui Tustin care duce la (2.26), sunt deduse modelele de sensibilitate în raport cu k_P și T_s , sunt introduse modelele de sensibilitate în structura sistemului de reglare fuzzy implicat în simulări și experimente pentru evaluarea funcțiilor obiectiv.

Pasul 2. Sunt stabilite valorile parametrilor de ponderare γ_{α_τ} , $\tau=1..m_P$, din funcțiile obiectiv definite în (2.9) – (2.12), pentru îndeplinirea specificațiilor de performanță ale sistemelor de reglare fuzzy, este definit momentul de timp discret final t_{df} pentru a înlocui ∞ în relațiile (2.9) – (2.12) astfel încât orizontul de timp finit să includă toate regimurile tranzitorii posibile ale sistemului de reglare fuzzy până când funcțiile obiectiv ating valori constante, este definit domeniul admisibil D_p astfel încât acesta să includă toate restricțiile impuse elementelor lui \mathbf{p} .

Pasul 3. Este asigurată legătura dintre problemele de optimizare (2.13) – (2.16) și algoritmi de optimizare inspirați din natură.

Pasul 4. Sunt aplicați algoritmi inspirați din natură pentru obținerea vectorului parametrilor optimali ai regulatorului și a valorilor optime ale acestor parametri:

$$\mathbf{p}^* = [\rho_1^* \quad \rho_2^* \quad \rho_3^*]^T, \beta^* = \rho_1^*, B_e^* = \rho_2^*, \eta^* = \rho_3^* \quad (2.30)$$

și este aplicată următoarea relație de acordare obținută din relația (2.28) pe baza relațiilor (2.23) și (2.26) aplicate pentru parametrii optimali ai regulatorului:

$$B_{\Delta e}^* = \frac{2T_s}{2\beta^* T_{\Sigma} - T_s} B_e^* \quad (2.31)$$

Metoda de proiectare este aplicată și validată în proiectarea T-S PI-FC în cadrul unui studiu de caz care urmărește reglarea poziției unghiulare a unui stand experimental construit în jurul unui echipament de laborator bazat pe un servosistem de curent continuu [Int07b]. Standul experimental este ilustrat în fig. 2.6 și fig. 2.7. Semnalele PWM aplicate procesului sunt proporționale cu semnalul de comandă produs de regulator. Caracteristicile principale ale standului experimental sunt [Int07b]: amplitudinea comenzii de 24 V, curentul de 3.1 A, cuplul de 15 Ncm, turația de 3000 rpm și masa inerțială de tip sarcină de 2.03 kg. Valorile nominale ale parametrilor procesului modelat în relațiile (2.7) și (2.20), obținute prin metoda celor mai mici pătrate, sunt $u_a = 0.15$, $u_b = 1$, $u_c = 0.15$, $k_{p0} = k_{EP0} = 140$ și $T_{\Sigma 0} = 0.92$ s.

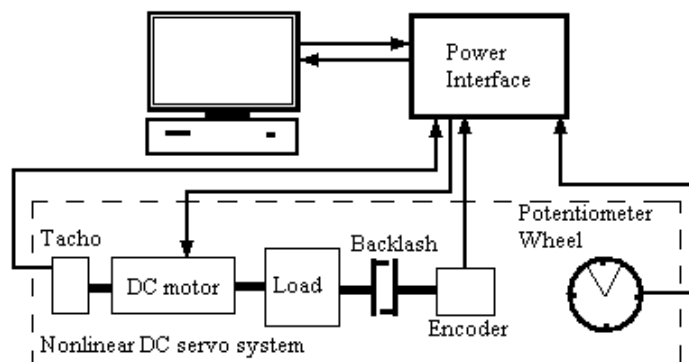


Fig. 2.6. Structura standului experimental utilizat în experimente.

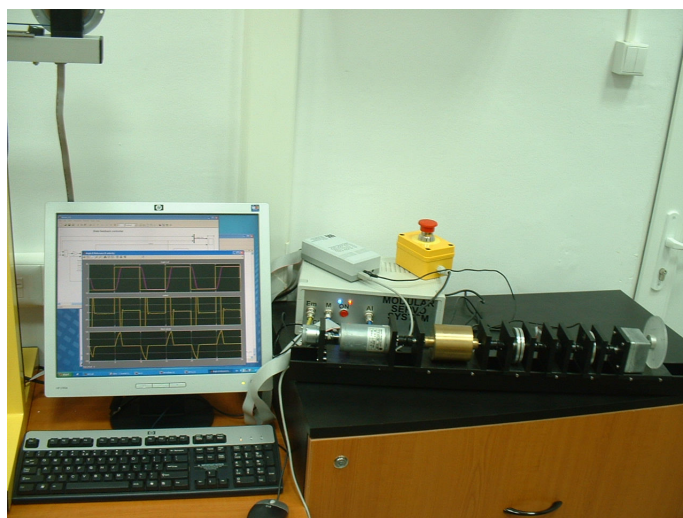


Fig. 2.7. Standul experimental din Laboratorul de conducere inteligentă a proceselor din cadrul Universității Politehnica Timișoara.

Parametri de ponderare din funcțiile obiectiv (2.9) – (2.12) au fost definiți astfel încât să se obțină un raport de $\{0, 0.1, 1, 10\}$ între valorile inițiale ale primului și celui de-al doilea termen al sumelor. Au fost obținute următoarele valori, care sunt utilizate ulterior în cadrul tezei:

- pentru $J_{1,k_p}(\rho)$:

$$(\gamma_{k_p})^2 \in \{0, 0.0021357, 0.021357, 0.21357\}, \quad (2.61)$$

- pentru $J_{1,T_{\Sigma}}(\rho)$:

$$(\gamma_{T_{\Sigma}})^2 \in \{0, 0.17187, 1.7187, 17.187\}, \quad (2.62)$$

- pentru $J_{2,k_p}(\rho)$:

$$(\gamma_{k_p})^2 \in \{0, 0.006858, 0.06858, 0.6858\}, \quad (2.63)$$

- pentru $J_{2,T_{\Sigma}}(\rho)$:

$$(\gamma_{T_{\Sigma}})^2 \in \{0, 0.0066695, 0.066695, 0.66695\}, \quad (2.64)$$

- pentru $J_{3,k_p}(\rho)$:

$$(\gamma_{k_p})^2 \in \{0, 3.9187, 39.187, 391.87\} , \quad (2.65)$$

- pentru $J_{3,T_\Sigma}(\rho)$:

$$(\gamma_{T_\Sigma})^2 \in \{0, 3.8693, 38.693, 386.93\} , \quad (2.66)$$

- pentru $J_{4,k_p}(\rho)$:

$$(\gamma_{k_p})^2 \in \{0, 0.142, 1.42, 14.2\} , \quad (2.67)$$

- pentru $J_{4,T_\Sigma}(\rho)$:

$$(\gamma_{T_\Sigma})^2 \in \{0, 0.15885, 1.5885, 15.885\} . \quad (2.68)$$

Variabilele funcțiilor obiectiv sunt inițializate luând în considerare următoarele limite care definesc spațiul de căutare D_ρ , care este în același timp și domeniul admisibil pentru ρ :

$$D_\rho = \{\beta \mid 3 \leq \beta \leq 17\} \times \{B_e \mid 20 \leq B_e \leq 40\} \times \{\eta \mid 0.25 \leq \eta \leq 0.75\} . \quad (2.69)$$

Algoritmii inspirați din natură prezentați în capitolul următor au fost rulați pentru regimul dinamic caracterizat printr-o modificare de tip treaptă a referinței, $r = r_0 = 40$ rad și o intrare de perturbație nulă, $d = d_0 = 0$.

Pentru garantarea stabilității sistemelor de reglare fuzzy pentru fiecare soluție potențială aparținând spațiului de căutare D_ρ cu parametrii acordați ai regulatorului fuzzy, este impusă o restricție suplimentară de tip inegalitate care asigură convergența funcției obiectiv:

$$|y(t_d) - r(t_d)| \leq \varepsilon_y |r(t_d) - r(t_0)| . \quad (2.70)$$

în care t_0 este timpul inițial, t_d este timpul final și $\varepsilon_y = 0.001$ pentru o zonă de liniștire de 2% specifică definirii timpului de reglare. Condiția (2.70) este verificată în regimurile staționare constante, astfel că teoretic $t_d \rightarrow \infty$ după cum este arătat în (2.9) – (2.12), dar t_d ia practic valori finite pentru a surprinde regimurile tranzitorii în răspunsurile sistemului de reglare fuzzy. Condiția (2.70) garantează stabilitatea sistemelor de reglare fuzzy, și de asemenea, asigură valoarea nulă a erorii de reglare în regimuri staționare constante.

În continuare, subcapitolul 2.2 este dedicat unui studiu bibliografic privind aplicațiile algoritmilor inspirați din natură în acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor fuzzy.

Capitolul se încheie cu prezentarea contribuțiilor autorului.

3. ALGORITMI INSPIRAȚI DIN NATURĂ PENTRU ACORDAREA OPTIMALĂ A PARAMETRILOR REGULATOARELOR FUZZY CU SENSIBILITATE PARAMETRICĂ REDUSĂ

Simulated Annealing (SA, călirea simulată) este un algoritm de optimizare care imită procesul metalurgic de călire [Kir83]. În general, când o substanță este supusă unui proces de călire, aceasta este inițial încălzită până când este atinsă temperatura de topire, iar apoi este răcită lent, în mod controlat, până când se resolidifică. Proprietățile substanței astfel obținute depind în mare măsură de viteza de răcire; dacă răcirea este rapidă, substanța va fi ușor casabilă din cauza unei structuri imperfecte, dacă răcirea este lentă, structura rezultată va fi bine organizată și puternică. De exemplu, unul din programele utilizate de regulă la scăderea temperaturii la fiecare pas are expresia:

$$\theta_{k+1} = \alpha_{cs} \theta_k \quad (3.1)$$

în care $\alpha_{cs} = \text{const}$, $\alpha_{cs} < 1$.

În rezolvarea unei probleme de optimizare cu ajutorul SA, structura substanței reprezintă soluția codificată a problemei, iar temperatura este folosită pentru a determina cum și când sunt acceptate noile soluții [Led07]. Algoritmul SA modelează un proces descris prin următoarea secvență de pași:

1. perturbarea soluției,
2. evaluarea calității soluției,
3. acceptarea soluției dacă aceasta este mai performantă.

Acești pași sunt repetați pentru fiecare prag al temperaturii până la atingerea valorii minime a acesteia. La temperaturi ridicate spațiul de căutare aferent problemei de optimizare este vast, dar odată cu scăderea temperaturii algoritmul își restrânge spațiul de căutare, încercând să rafineze soluția găsită la temperatură ridicată.

Algoritmul SA descris mai sus a fost folosit ca algoritm inspirat din natură în pasul 4 al metodei de proiectare dedicate regulatoarelor simple fuzzy-PI de tip T-S prezentate în capitolul anterior. Mecanismul de funcționare a algoritmului SA, descris în fig. 3.1.1, îi asigură avantajul evitării blocării în puncte de minim local.

Particle Swarm Optimization (PSO) a fost dezvoltat și introdus inițial de către Eberhart și Kennedy [Ken95a], [Ken95b]. PSO este un algoritm de căutare bazat pe evoluția populației și simulează comportamentul păsărilor, albinelor sau a bancurilor de pești. Fiecare individ din cadrul roiului de particule este reprezentat de către un vector de poziție în spațiul de căutare multidimensional $\mathbf{X}_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{iq}]^T \in \mathbf{R}^q$ și un vector de viteză $\mathbf{V}_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{iq}]^T$.

Fiecare particulă își actualizează viteza utilizând atât viteza curentă și cea mai bună poziție explorată până la acel moment $\mathbf{P}_{i,Best} = [p_{i1} \ p_{i2} \ \dots \ p_{iq}]^T$ cât și cea mai bună poziție explorată de către întregul roi $\mathbf{P}_{g,Best} = [p_{g1} \ p_{g2} \ \dots \ p_{gq}]^T$ [Val08]. Urmează actualizarea poziției și vitezei fiecărei particule conform relațiilor:

$$\mathbf{V}_i(k+1) = w(k)\mathbf{V}_i(k) + c_1 r_1 (\mathbf{P}_{g,Best} - \mathbf{X}_i(k)) + c_2 r_2 (\mathbf{P}_{i,Best} - \mathbf{X}_i(k)) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{X}_i(k+1) = \mathbf{X}_i(k) + \mathbf{V}_i(k+1) \quad (3.5)$$

în care r_1, r_2 sunt variabile aleatoare uniform distribuite în intervalul $[0, 1]$, $i, i=1\dots n$ este indicatorul particulei curente din roi, n reprezintă numărul particulelor din roi, $k, k=1\dots k_{\max}$ indică iterația curentă, iar k_{\max} este numărul maxim de iterații. Parametrul $w(k)$ în relația (3.4) reprezintă ponderea inerțială, care penalizează efectul vectorului anterior de viteză asupra noului vector de viteză și ia valori între două limite prestabilite w_{\min} și w_{\max} ce previn mișcările rapide în spațiul de căutare.

Acest proces este repetat de un număr predefinit de iterații în cadrul algoritmului PSO până la verificarea condiției de oprire a procesului iterativ de calcul. În fig. 3.2.1 este descris succint mecanismul de funcționare a algoritmului PSO.

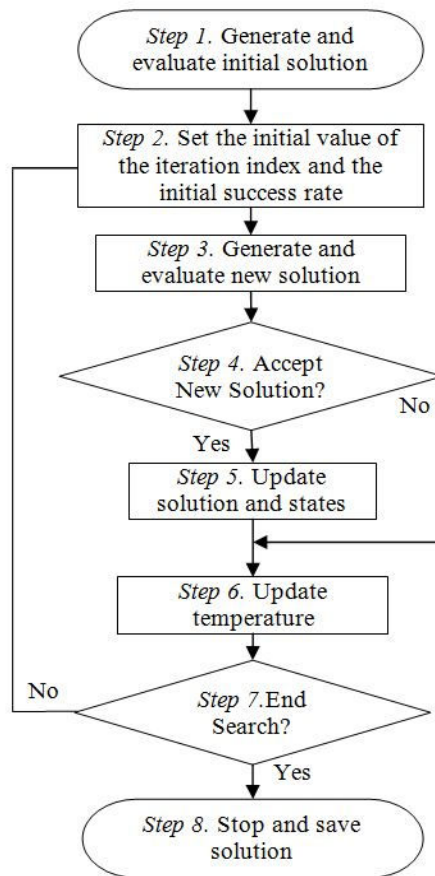


Fig. 3.1.1. Organigrama algoritmului SA.

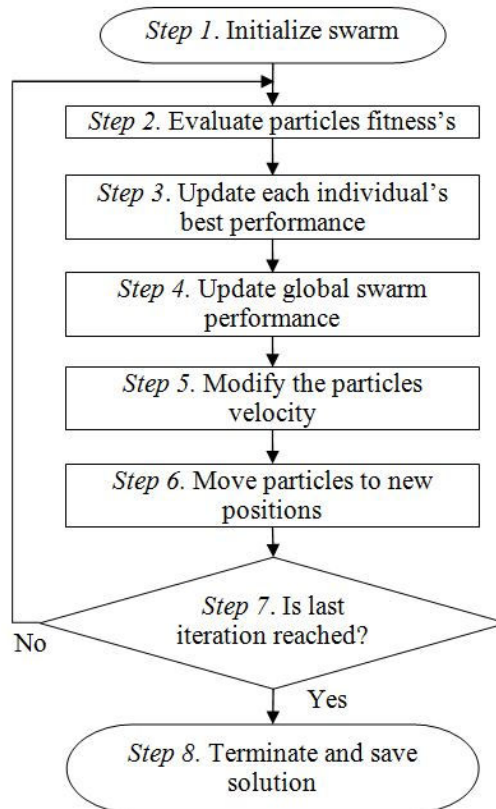


Fig. 3.2.1. Organigrama algoritmului PSO.

Gravitational Search Algorithm (GSA) [Ras07], [Ras09] este un algoritm de optimizare, inspirat din legile gravitației și dinamicii [Sch03], [Hol05]. Conform acestor legi, forța gravitațională dintre două particule este direct proporțională cu produsul maselor și invers proporțională cu pătratul distanței dintre acestea, iar aplicarea unei forțe unei particule conduce la accelerație, care depinde de forță și de masa acesteia. Deprecierea valorii constantei gravitaționale în funcție de timp, specifică vârstei universului, este exprimată, de regulă, cu ajutorul funcțiilor liniare sau exponențiale.

În GSA agenții de căutare sunt considerați ca particule [Ras10], iar performanțele lor sunt măsurate folosind masele acestora. În GSA, fiecare particulă are patru caracteristici: poziție, masă inerțială, masă gravitațională activă și masă gravitațională pasivă [Ras07], [Ras09]. Poziția particulelor corespunde unei soluții a problemei, iar masele gravitaționale și inerțiale sunt determinate prin evaluarea valorilor funcțiilor obiectiv. Prin trecerea timpului (în speță, prin parcurgerea iterațiilor algoritmului) este de așteptat ca particulele să fie atrase de către alte particule cu greutate mai mare.

Considerând N mase (agenți) și un spațiu de căutare q -dimensional, poziția agentului i este definită de vectorul:

$$\mathbf{X}_i = [x_i^1 \dots x_i^d \dots x_i^q]^T, \quad i = 1 \dots N, \quad (3.11)$$

în care x_i^d este poziția agentului i în dimensiunea d .

Toate aceste particule exercită forțe de atracție gravitațională între ele, iar aceste forțe determină o mișcare globală a tuturor particulelor înspre cele cu mase mari. Mișcarea este descrisă cu ajutorul relațiilor:

$$\begin{aligned} v_i^d(k+1) &= \rho_i v_i^d(k) + a_i^d(k), \\ x_i^d(k+1) &= x_i^d(k) + v_i^d(k+1), \end{aligned} \quad (3.16)$$

în care ρ_i , $0 \leq \rho_i \leq 1$, este o variabilă aleatoare uniform distribuită, $v_i^d(k)$ este viteza agentului i la iterația k în dimensiunea d , $a_i^d(k)$ este accelerația agentului i la iterația k în dimensiunea d :

$$a_i^d(k) = F_i^d(k) / m_i(k), \quad (3.15)$$

$m_i(k)$ este masa inerțială relativă agentului i , forța totală ce acționează asupra acestuia are expresia:

$$F_i^d(k) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \rho_j g(k) \frac{m_i(k)m_j(k)}{r_{ij}(k) + \varepsilon} [x_j^d(k) - x_i^d(k)], \quad (3.12)$$

ρ_j , $0 \leq \rho_j \leq 1$, este un parametru aleator, $m_j(k)$ este masa agentului j , $\varepsilon > 0$ este o constantă cu valoare neglijabilă și $r_{ij}(k)$ este distanța euclidiană dintre agenții i și j .

În fig. 3.3 este prezentată organigrama algoritmului GSA. Masele sunt calculate pe baza relațiilor:

$$\begin{aligned} n_i(k) &= [f_i(k) - w(k)] / [b(k) - w(k)], \\ m_i(k) &= n_i(k) / \sum_{j=1}^N n_j(k), \end{aligned} \quad (3.17)$$

în care $f_i(k)$ este valoarea funcției obiectiv a agentului i la iterația k , $b(k) = \min_{j=1, N} f_j(k)$ este valoarea minimă a funcției obiectiv și $w(k) = \max_{j=1, N} f_j(k)$ este valoarea maximă a funcției obiectiv.

Din cele prezentate anterior rezultă că masele interacționează prin forțe gravitaționale. Particulele cu mase mari – care corespund soluțiilor favorabile, de exemplu, celor apropiate de punctul de minim – se deplasează mai lent decât cele cu mase reduse, acest lucru garantând partea de exploatare a algoritmului.

Pentru a rezolva unele limitări observate în folosirea variantelor standard ale acestor algoritmi inspirați din natură, a fost propusă hibridizarea acestora. Un astfel de exemplu este **hibridizarea PSO și GSA** [Mir10], prin care a fost obținută o tehnică de căutare îmbunătățită prin îmbinarea avantajelor celor doi algoritmi. Pentru a obține acest lucru, a fost preluată din PSO abilitatea de gândire colectivă și de exploatare, peste care a fost suprapusă tehnica de căutare și abilitățile de explorare specifice GSA.

În algoritmul PSO-GSA hibrid a fost păstrat mecanismul de bază bazat pe particule (denumite și agenți) aferent PSO. Astfel, particulele sunt caracterizate în continuare prin vectori de poziție și viteză.

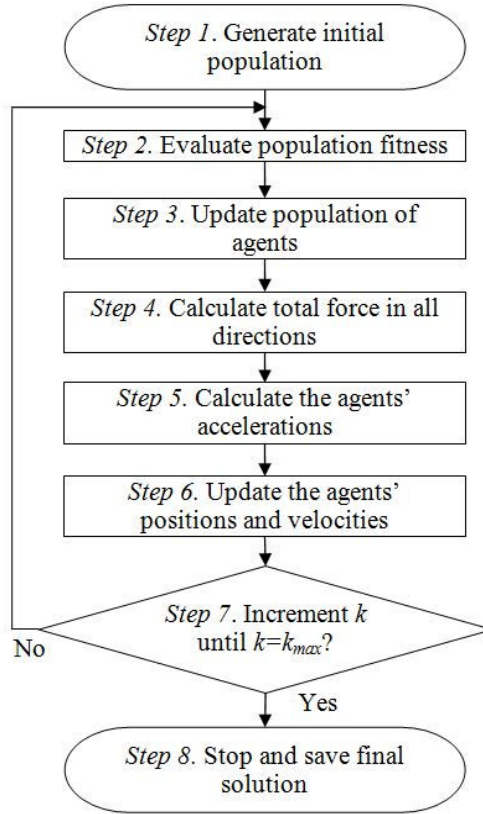


Fig. 3.3. Organigrama algoritmului GSA.

Algoritmul **Charged System Search (CSS)** folosește legi din electrostatică și din dinamică [Kav10], [Kav10b], [Kav10c]. CSS conține un număr N de agenți, care sunt denumiți particule încărcate. Fiecare agent i este considerat o sferă încărcată (cu sarcină electrică) $q(i)$, iar mărimea acesteia la iterația k este calculată pe baza relației:

$$q_{c,i}(k) = \frac{g_i(k) - g_{best}(k)}{g_{best}(k) - g_{worst}(k)}, \quad i = 1 \dots N, \quad (3.22)$$

în care $g_{best}(k)$ și $g_{worst}(k)$ sunt cea mai bună și respectiv cea mai slabă valoare a funcției obiectiv aferente tuturor sarcinilor la iterația k , iar $g_i(k)$ reprezintă valoare funcției obiectiv corespunzătoare sarcinii i la iterația k .

Agenții exercită o forță electrică asupra altor agenți, calculată cu formula:

$$\mathbf{F}_i(k) = q_i(k) \sum_{i,j \neq i} \left(\frac{q_j(k)r_{ij}(k)i_1}{a^3} + \frac{q_j(k)i_2}{r_{ij}^2(k)} \right) c_{ij}(\mathbf{X}_i(k) - \mathbf{X}_j(k)), \quad (i_1, i_2) = \begin{cases} (0,1), & \text{if } r_{ij}(k) \geq a, \\ (1,0), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.25)$$

în care $r_{ij}(k)$ este distanța de separare a două sarcinii, la iterația k , exprimată sub forma:

$$r_{ij}(k) = \frac{\|\mathbf{X}_i(k) - \mathbf{X}_j(k)\|}{\left\| \frac{(\mathbf{X}_i(k) + \mathbf{X}_j(k))}{2} - \mathbf{X}_{best}(k) \right\| + \varepsilon \mathbf{X}_i(k)}, \quad \mathbf{X}_o(k) \in \mathbf{R}^{q_s}, \quad o \in \{i, j, best\}, \quad (3.23)$$

$\mathbf{X}_i(k)$ și $\mathbf{X}_j(k)$ sunt pozițiile sarcinilor i și j la iterația k , $\mathbf{X}_{best}(k)$ este poziția celei mai bune sarcini la iterația k , iar ε este o constantă pozitivă de valoare neglijabilă.

Parametrul c_{ij} din relația (3.10) determină tipul și gradul interacțiunii unei sarcini i asupra alteia j și este calculat cu formula:

$$c_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{fit}(i) < \text{fit}(j), \\ 1, & \text{fit}(i) \geq \text{fit}(j). \end{cases} \quad (3.24)$$

Forțele rezultante și legile mișcării determină vectorii noi de poziție și viteză a agenților, $\mathbf{X}_i(k+1)$ și respectiv $\mathbf{v}_i(k+1)$, actualizați pe baza relațiilor:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i(k+1) &= r_{i1} k_a(k) \left(\frac{\mathbf{F}_i}{m_i} \right) (\Delta k)^2 + r_{i2} k_v(k) \mathbf{v}_i(k) \Delta k + \mathbf{X}_i(k), \\ \mathbf{v}_i(k+1) &= \frac{\mathbf{X}_i(k+1) - \mathbf{X}_i(k)}{\Delta k}, \end{aligned} \quad (3.26)$$

în care r_{i1} și r_{i2} sunt numere aleatoare distribuite uniform în intervalul $[0, 1]$, $m_j(k)$ este masa sarcinii j la iterația k , de regulă considerată egală cu $q_j(k)$, Δk este pasul de timp considerat de valoare 1, $k_a(k)$ este un coeficient de accelerație la iterația k și $k_v(k)$ este un coeficient de viteză la iterația k , calculați conform relațiilor:

$$k_a(k) = 3\left(1 - \frac{k}{k_{\max}}\right), k_v(k) = 0.5\left(1 + \frac{k}{k_{\max}}\right), \quad (3.27)$$

iar k_{\max} este numărul maxim de iterații.

Folosirea acestor legi determină un compromis între abilitățile de explorare și exploatare a algoritmului și determină utilizarea relativ simplă a CSS în problemele de optimizare în timp continuu și în timp discret.

O particulă interacționează cu alte particule prin câmpuri electrice. Mărimea forței rezultante este determinată folosind legile electrostaticii, iar deplasarea este calculată folosind legile dinamicii. O sarcină cu rezultate bune exercită o forță de atracție proporțională cu intensitatea sa asupra celorlalte sarcini, iar în mod opus o sarcină cu rezultate mai slabe va exercita o forță de respingere, astfel manifestându-se proprietățile de explorare și exploatare ale algoritmului CSS. Acest proces de căutare este descris în fig. 3.4.

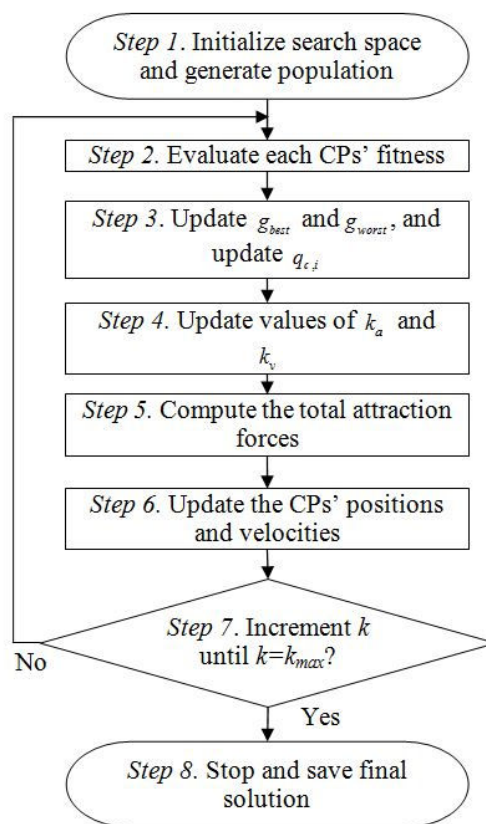


Fig. 3.4. Organigrama algoritmului CSS.

Cu toate că variantele standard ale algoritmilor inspirați din natură au arătat rezultate promițătoare [Pre13a], eficiență computațională și ușurință în implementare, aceștia se bazează pe valori predefinite ale parametrilor. Prin urmare, se ignoră stadiul în care se află procesul de căutare. Astfel, algoritmii își pierd din eficiență prin neglijarea raportului dintre capacitățile de explorare-exploatare și pot rămâne blocați în minime locale.

Pentru a evita aceste neajunsuri, este importantă dezvoltarea unei metode adaptive de folosire a resurselor cu scopul de a îmbunătăți performanțele algoritmilor și de evita blocajele în puncte de minim local. O astfel de metodă a fost propusă și implementată pentru GSA în [Pre12a], [Pre13d] și CSS în [Pre14c].

Versiunile adaptive ale algoritmilor menționați oferă un proces de căutare superior variantelor standard prin îmbunătățirea capacității de explorare a spațiului de căutare bazându-se pe adaptarea etapizată a parametrilor algoritmilor. Această dezvoltare etapizată a parametrilor algoritmilor a fost inspirată dintr-un model de învățare descris în [Byb02] și [Bal06] și este descrisă în fig. 3.5. Modelul de învățare este bazat pe cinci etape (5E): angajare, explorare, explicare, extensie și evaluare.

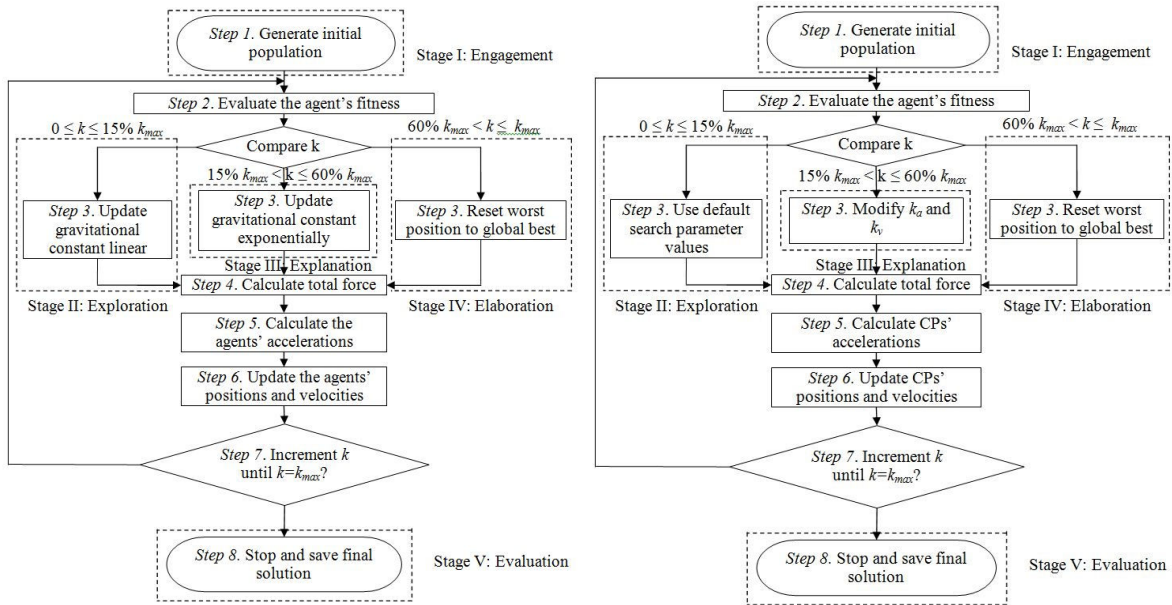


Fig. 3.5. Organigramele algoritmilor adaptivi GSA și CSS.

Algoritmii descriși anterior au fost integrați în pasul 4 al metodei de proiectare prezentată în cadrul capitolului 2, folosind parametri specifici algoritmilor care asigură un compromis între viteza de convergență și probabilitatea de a evita blocajul în puncte de minim local. Valorile acestor parametri au fost alese pe baza experienței anterioare a autorului acestei teze.

În vederea exemplificării rezultatelor obținute, în tabelul 3.2.3 sunt prezentate rezultatele obținute pentru algoritmul PSO și funcția obiectiv J_{2,k_p} .

Tabelul 3.2.3. Rezultate obținute pentru minimizarea funcției obiectiv J_{2,k_p} folosind algoritmul PSO.

$(\gamma_{k_p})^2$	$B_{\Delta e}^*$	B_e^*	η^*	β^*	k_c^*	T_i^*	$J_{2,k_p} \min$
0	0.085597	40	0.75	5.08485	0.003443	4.67806	22975.7
0.006858	0.085597	40	0.75	5.08485	0.003443	4.67806	32579.1
0.06858	0.085597	40	0.75	5.08485	0.003443	4.67806	119010
0.6858	0.012792	20	0.25	17	0.001883	15.64	874183

Împreună cu aceste valori, în cadrul tezei este prezentată pentru fiecare algoritm menționat o analiză a evoluției parametrilor funcției obiectiv împreună cu valorile optime ale acestora și o descriere a evoluției vectorului variabilelor problemei (parametrilor de acordare ai regulatorului fuzzy) de-a lungul procesului de căutare. Aceste rezultate sunt validate pe baza experimentelor în timp real.

Pentru a limita zgomotele introduse de parametrii aleatori specifici acestor algoritmi și a prezenta corect rezultatele din punctul de vedere al repetabilității, în obținerea fiecărui rezultat au fost necesare rulări multiple ale algoritmului propus. Astfel, valorile medii ale celor mai bune rezultate obținute pentru fiecare algoritm au fost cuprinse într-un indicator de performanță (calitate) notat cu $Avg(J_{i,\alpha_\tau} \min)$ și calculat pe baza relației:

$$Avg(J_{i,\alpha_\tau} \min) = \frac{1}{N_{best}} \sum_{j=1}^{N_{best}} J_{i,\alpha_\tau} \min^{(j)}, \quad (3.41)$$

în care $J_{i,\alpha_\tau} \min$ este valoarea funcției obiectiv obținută prin rularea unui algoritm inspirat din natură, indicele inferior $i, i=1..4$, descrie una din cele patru funcții obiectiv, $\alpha_\tau, \tau=1..m_p$ ($m_p=2$) este parametrul procesului considerat în această teză, $\alpha_\tau \in \{k_p, T_\Sigma\}$, N_{best} este numărul celor mai bune valori obținute pentru fiecare funcție obiectiv și parametrul de ponderare, indicele superior $j, j=1..N_{best}$, indică valoarea funcției obiectiv $J_{i,\alpha_\tau} \min$ obținută la o anumită rulare a algoritmului din cele N_{best} rulări. În tabelul 3.8.1.3 sunt prezentate valorile corespunzătoare acestui indicator în cazul funcției obiectiv J_{2,k_p} . Rezultatele prezentate au fost obținute după $N_{best} = 5$ rulări.

Tabelul 3.8.1.3. Valorile indicatorului de performanță $Avg(J_{2,k_p \min})$ pentru minimizarea funcției obiectiv J_{2,k_p} .

$(\gamma^{k_p})^2$	SA	PSO	GSA	PSOGSA	CSS	GSA adaptiv	CSS adaptiv
0	23017	23012	23511	23965	23129	23129	22976
0.006858	32647	32579	32817	36335	37931	32749	32847
0.06858	118967	119048	119306	119807	119467	119375	119075
0.6858	874484	874183	874149	873857	874183	874162	874183

Un al doilea indicator de performanță aplicat acestor algoritmi este viteza de convergență (c_s). Conform definiției din [Pre13a], acest indicator este reprezentat de numărul de evaluări ale funcției obiectiv necesare până când este găsită valoarea minimă a acesteia. În tabelul 3.8.2.3 sunt prezentate rezultatele aferente indicatorului c_s pentru funcția obiectiv J_{2,k_p} .

Tabelul 3.8.2.3. Valori medii ale indicatorului de performanță c_s pentru minimizarea funcției obiectiv J_{2,k_p} .

$(\gamma^{k_p})^2$	c_s SA	c_s PSO	c_s GSA	c_s PSOGSA	c_s CSS	c_s GSA adaptiv	c_s CSS adaptiv
0	3035	1906	1399	1660	1358	1718	1905
0.006858	2894	1704	1172	400	609	1839	1135
0.06858	165	1623	915	1613	973	1142	1935
0.6858	2748	105	1846	678	53	891	78

Indicatorul c_s ilustrează cât de repede este atinsă soluția, însă fără a oferi detalii despre calitatea soluției obținute. Această limitare este soluționată prin introducerea celui de-al treilea indicator de performanță, rata de precizie (a_r). Acest indicator este definit ca procent al raportului dintre deviația standard și valoarea medie a valorilor funcțiilor obiectiv:

$$a_r = StDev\%(J_{i,\alpha_r \min}) = 100 \frac{StDev(J_{i,\alpha_r \min})}{Avg(J_{i,\alpha_r \min})}, \quad i = 1 \dots 4, \quad (3.42)$$

în care valoarea medie $Avg(J_{i,\alpha_r \min})$ a fiecărei funcții obiectiv este calculată folosind relația (3.41), iar deviația standard $StDev(J_{i,\alpha_r \min})$ este calculată conform relației:

$$StDev(J_{i,\alpha_r \min}) = \sqrt{\frac{1}{N_{best} - 1} \sum_{j=1}^{N_{best}} (J_{i,\alpha_r \min}^{(j)} - Avg(J_{i,\alpha_r \min}))^2}, \quad (3.43)$$

iar notațiile sunt similare celor din (3.41). În tabelul 3.8.3.3 sunt prezentate valorile acestui indicator pentru valoarea minimizată a funcției obiectiv J_{2,k_p} .

Tabelul 3.8.3.3. Valori medii ale indicatorului a_r pentru minimizarea funcției obiectiv J_{2,k_p} .

$(\gamma^{k_p})^2$	a_r SA	a_r PSO	a_r GSA	a_r PSOGSA	a_r CSS	a_r GSA adaptiv	a_r CSS adaptiv
0	0.1379	0.2702	2.1778	5.6485	0.5706	0.6448	0.0012
0.006858	0.1871	0.0007	0.431	13.1324	12.232	0.1393	0.5406
0.06858	0.0859	0.0386	0.0995	0.604	0.217	0.296	0.0947
0.6858	0.0356	0	0.0022	0.0647	0	0.0027	0

Reducerea sensibilității parametrice a fost demonstrată cu ajutorul rezultatelor de simulare numerică a comportării sistemelor de reglare fuzzy pentru diferite valori ale parametrilor k_p și T_Σ ai procesului comparate cu valorile nominale $k_{p0} = k_{EP0} = 140$ și respectiv $T_{\Sigma 0} = 0.92$ s. Nu a fost posibilă efectuarea unor experimente utilizând standul de laborator deoarece acesta nu permite modificarea parametrilor procesului.

Demonstrația se sprijină pe simulări care implică variația parametrilor procesului împreună cu valorile inițiale și cele optimale ale parametrilor reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S. Au fost urmărite și prezentate două aspecte legate de variația parametrilor procesului pentru fiecare funcție obiectiv și parametru al procesului: variația valorilor funcțiilor obiectiv de-a lungul iterațiilor algoritmilor pentru diverse valori ale parametrilor procesului și evoluția în timp a ieșirii sistemului de reglare fuzzy.

Și acest capitol se încheie cu prezentarea contribuțiilor autorului.

4. ACORDAREA OPTIMALĂ A PARAMETRILOR FUNCȚIILOR DE APARTENENȚĂ DE INTRARE A MODELELOR FUZZY TAKAGI-SUGENO BAZATĂ PE ALGORITMUL SIMULATED ANNEALING

După cum a fost menționat în capitolul 1, diverși parametri ai modulelor structurii modelelor fuzzy de tip Takagi-Sugeno (T-S) pot fi acordați optimal. În cadrul acestei teze este efectuată acordarea optimală a unor parametri a funcțiilor de apartenență de intrare. Aceasta este organizată ca o abordare de modelare care se bazează pe parcurgerea pașilor următori:

Pasul 1. Este definită structura modelului fuzzy dinamic de tip T-S, în speță, numărul punctelor de funcționare (egal cu numărul de reguli), numărul termenilor lingvistici ai variabilelor de intrare, forma termenilor lingvistici ai funcțiilor de apartenență de intrare, operatorii din mecanismul de inferență și metoda de defuzzificare.

Pasul 2. Este efectuată liniarizarea modelului de stare neliniar cu timp continuu al procesului condus în vecinătatea unor puncte de funcționare importante, iar acest număr este egal cu numărul regulilor modelului fuzzy dinamic de tip T-S. Aceasta conduce la un set de modele locale liniare cu timp continuu ale procesului, care sunt plasate în concluziile regulilor modelului fuzzy de tip T-S cu timp continuu și sunt asociate valorilor modale ale funcțiilor de apartenență de intrare, ce reprezintă coordonatele punctelor de funcționare conform principiului echivalenței modale [Gal95]. Este stabilită valoarea perioadei de eșantionare și modelele din concluziile regulilor modelelor fuzzy de tip T-S sunt discretizate ținând seama de prezența ZOH rezultând astfel baza de reguli a modelului fuzzy de tip T-S cu timp discret.

Pasul 3. Considerând vectorul parametrilor ρ care conține o parte a parametrilor funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelului fuzzy dinamic de tip T-S, este definită următoarea problemă de optimizare:

$$\rho^* = \arg \min_{\rho \in D} J(\rho) \quad (4.1)$$

în care ρ^* este vectorul parametrilor optimali ai modelului fuzzy și, în același timp, soluția problemei de optimizare, iar D este domeniul admisibil (fezabil) al lui ρ . Funcția obiectiv $J(\rho)$ din (4.1) are expresia:

$$J(\rho) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k(\rho) - y_{k,m}(\rho))^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e_{k,m}(\rho))^2, \quad (4.2)$$

în care $y_k(\rho) = \lambda_k(\rho)$ este ieșirea procesului la intervalul k de eșantionare, $y_{k,m}(\rho)$ este ieșirea modelului fuzzy, $e_{k,m}(\rho) = y_k(\rho) - y_{k,m}(\rho)$ este eroarea de modelare și N este lungimea orizontului de timp. Problema de optimizare (4.1), prin funcția obiectiv (4.2) urmărește minimizarea mediei sumei pătratelor erorilor de modelare.

Pasul 4. Este aplicat un algoritm inspirat din natură în rezolvarea problemei de optimizare (4.1), pentru obținerea parametrilor optimali ai funcțiilor de apartenență de intrare, care conduce la modelul fuzzy optimal de tip T-S al procesului.

Variabilele de intrare menționate în pasul 1 al abordării de modelare sunt de fapt variabilele de tip scheduling care sunt implicate în premisele regulilor modelului fuzzy dinamic de tip T-S.

Pașii 1 și 2 generează modelul fuzzy inițial de tip T-S al procesului, iar în pasul 4 se obține modelul fuzzy optimal de tip T-S al procesului. Acești doi pași ai abordării de modelare fuzzy pot fi înlocuiți cu o metodă adecvată de identificare a modelului fuzzy. În lucrările [Sy08], [Kha10b], [Lu10], [Wat10], [Anh12], [Li12b] și [Moh13] sunt oferite câteva aplicații reprezentative ale metodelor de identificare a modelelor fuzzy.

Abordarea prezentată este aplicată în cadrul acestui capitol pentru modelarea a două procese neliniare folosind algoritmul Simulated Annealing (SA) ca algoritm inspirat din natură în pasul 4. Aceste procese sunt un sistem anti-blocaj al roților și un sistem cu levitație magnetică, iar modelele fuzzy de tip T-S propuse sunt validate prin experimente în timp real folosind două standuri experimentale.

Subcapitolul 4.2 este dedicat unui studiu bibliografic privind aplicațiile algoritmilor inspirați din natură în acordarea optimală a parametrilor funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelelor fuzzy.

În continuare, acest rezumat continuă cu o prezentare sumară a rezultatelor obținute în acordarea optimală a parametrilor funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelelor fuzzy pentru un sistem de levitație magnetică. Problema levitației magnetice se referă la o sferă metalică menținută într-un câmp electromagnetic conform fig. 4.4.1. Folosirea modelelor fuzzy în acest caz este justificată de neliniaritățile specifice acestor sisteme.

Abordarea de modelare fuzzy pentru sistemul considerat pornește de la modelul matematic primar de stare aferent unui sistem cu levitație magnetică alcătuit din doi electromagneți [Int08]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2, \\
 \dot{x}_2 &= -\frac{1}{m} \cdot \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}} \cdot e^{-\frac{x_1}{F_{emP1}}} \cdot x_3^2 + g + \frac{1}{m} \cdot \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}} \cdot e^{-\frac{x_d - x_1}{F_{emP2}}} \cdot x_4^2, \\
 \dot{x}_3 &= \frac{1}{\frac{f_{iP1}}{f_{iP2}} \cdot e^{-\frac{x_1}{f_{iP2}}}} (k_i u_1 + c_i - x_3), \\
 \dot{x}_4 &= \frac{1}{\frac{f_{iP1}}{f_{iP2}} \cdot e^{-\frac{x_d - x_1}{f_{iP2}}}} (k_i u_2 + c_i - x_4), \\
 y &= x_1,
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

în care $u = u_1$ este comanda (tensiunea aplicată electromagnetului superior), $d = u_2$ este perturbația (tensiunea aplicată electromagnetului inferior), $0.0049 \leq u_1, u_2 \leq 1$, x_i sunt variabilele de stare, x_1 este poziția sferei, $0 \leq x_1 \leq 0.016m$, x_2 este viteza sferei, x_3 și x_4 sunt intensitățile curenților din bobina superioară respectiv inferioară, $0.038A \leq x_3, x_4 \leq 2.38A$ și y este ieșirea. Valorile numerice corespunzătoare acestor parametri sunt preluate din [Int08].

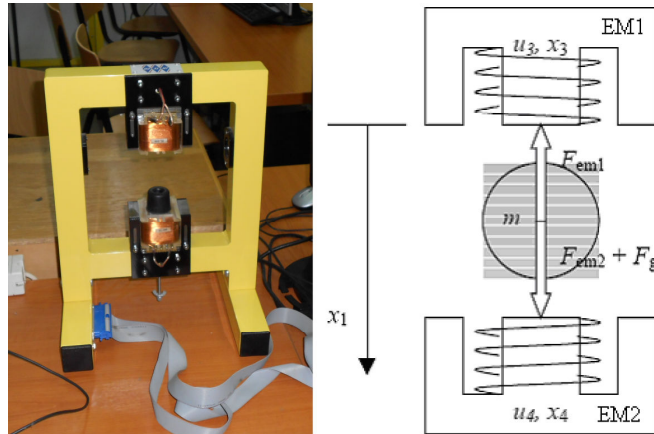


Fig. 4.4.1. Sistemul cu levitație magnetică cu doi electromagneți INTECO și schema bloc.

Variabilele de intrare (scheduling) luate în considerare pentru modelul fuzzy de tip T-S sunt x_1 și x_2 , adică primele două variabile de stare în relația (4.20). Modelul de ordinul patru din relația (4.20) este redus în continuare la un model de stare de ordinul trei, pentru $u_2 = 0$:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta u \\ y = \mathbf{C}^T \mathbf{x} \end{cases}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix}, \tag{4.21}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}^T = [1 \quad 0 \quad 0]$$

în care elementele matricelor \mathbf{A} și \mathbf{B} sunt [Dav12c]:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= 0, a_{12} = 1, a_{13} = 0, a_{14} = 0, \\
a_{21} &= \frac{x_{30}^2}{m} \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}^2} e^{-\frac{x_{10}}{F_{emP2}}} + \frac{x_{40}^2}{m} \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}^2} e^{-\frac{x_d - x_{10}}{F_{emP2}}}, a_{22} = 0, \\
a_{23} &= -\frac{2x_{30}}{m} \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}} e^{-\frac{x_{10}}{F_{emP2}}}, a_{24} = \frac{2x_{40}}{m} \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}} e^{-\frac{x_d - x_{10}}{F_{emP2}}}, \\
a_{31} &= \frac{f_{iP2}}{f_{iP1}} \cdot e^{\frac{x_{10}}{F_{emP2}}} \cdot (k_i u_1 + c_i - x_{30}), a_{32} = 0, a_{33} = -\frac{1}{f_{iP1}} \cdot e^{\frac{x_{10}}{F_{emP2}}}, a_{34} = 0, \\
a_{41} &= -\frac{1}{f_{iP1}} \cdot e^{\frac{x_d - x_{10}}{F_{emP2}}} \cdot (k_i u_2 + c_i - x_{40}), \\
a_{42} &= 0, a_{43} = 0, a_{44} = -\frac{f_{iP2}}{f_{iP1}} \cdot e^{\frac{x_d - x_{10}}{F_{emP2}}}, \\
b_{11} &= 0, b_{21} = 0, b_{31} = k_i \cdot \frac{f_{iP2}}{f_{iP1}} \cdot e^{\frac{x_{10}}{F_{emP2}}}, b_{41} = k_i \cdot \frac{f_{iP2}}{f_{iP1}} \cdot e^{\frac{x_d - x_{10}}{F_{emP2}}}.
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Pentru stabilizarea sferei din sistemul de levitație magnetică, este proiectată o structură de reglare după stare prin metoda alocării polilor pentru stabilizarea modelului de stare liniar instabil (4.21), care conduce la matricea compensator (stabilizator):

$$\mathbf{k}_c^T = [36 \quad 5 \quad 0.0075]. \tag{4.23}$$

Aceasta conduce la următorul model de stare liniarizat de ordinul trei aferent sistemului de reglare după stare (în buclă închisă):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} r_x, \\ y = \mathbf{C}^T \mathbf{x} \end{cases}, \quad \mathbf{x} = [\Delta x_1 \quad \Delta x_2 \quad \Delta x_3]^T. \tag{4.24}$$

Variabila r_x din relația (4.24) reprezintă referința sistemului de reglare după stare (procesului stabilizat prin reacție după stare).

Pasul 1 al abordării de modelare începe cu etapa de fuzzificare, prin definirea domeniilor maxime de variație a celor două variabile de stare în toate regimurile de funcționare:

$$-0.2 \leq x_1 \leq 0.2, -8.757 \leq x_3 \leq 18.765. \tag{4.25}$$

De asemenea, pentru fuzzificare, termenii lingvistici asociați variabilelor de intrare sunt definiți astfel: variabila de intrare x_1 are trei termeni lingvistici $LT_{x_1,j}, j=1...3$, cu funcțiile de apartenență de intrare de tip triunghiular. Aceștia sunt definiți și referiți ca $LT_{x_1,1}$ cu universul discursului $[-0.2 \quad 0]$, $LT_{x_1,2}$ cu universul discursului $[-0.1 \quad 0.1]$, și $LT_{x_1,3}$ cu universul discursului $[-0.2 \quad 0]$. Funcțiile de apartenență de intrare ale mulțimilor fuzzy aferente acestor termeni lingvistici au expresiile:

$$\mu_{LT_{x_1,j}}(x_1) = \begin{cases} 0, & x_1 < a_{x_1,j}, \\ 1 + \frac{x_1 - b_{x_1,j}}{b_{x_1,j} - a_{x_1,j}}, & x_1 \in [a_{x_1,j}, b_{x_1,j}), \\ 1 - \frac{x_1 - b_{x_1,j}}{c_{x_1,j} - b_{x_1,j}}, & x_1 \in [b_{x_1,j}, c_{x_1,j}), \\ 0, & x_1 \geq c_{x_1,j}. \end{cases} \tag{4.26}$$

$$a_{x_1,j} < b_{x_1,j} < c_{x_1,j}, \quad j=1...3,$$

în care valorile modale inițiale ale funcțiilor de apartenență de intrare sunt parametrii $a_{x_1,j}$, $b_{x_1,j}$, și $c_{x_1,j}$, $j=1...3$. Parametrii $a_{x_1,j}, j=1...3$ și $c_{x_1,j}, j=1...3$, ce indică alte valori modale ale funcțiilor de apartenență de intrare, sunt constanți, cu valorile prezentate în tabelul 4.4.2 [Dav12c]. Parametrii $b_{x_1,j}, j=1...3$ sunt variabili.

Pentru cea de-a doua variabilă de intrare, x_3 , sunt definiți trei termeni lingvistici, $LT_{x_3,j}, j=1...3$, cu primul și al treilea termen modelați prin funcții de apartenență de tip trapezoidal, și al doilea termen modelat printr-o funcție de apartenență de tip gaussian. Universurile discursului funcțiilor de apartenență de intrare ale mulțimilor fuzzy aferente acestor termeni lingvistici sunt: $[-8.757 \quad 4.3785]$ pentru $LT_{x_3,1}$, $[3.753 \quad 4.3785]$ pentru $LT_{x_3,2}$ și $[4.3785 \quad 18.765]$ pentru $LT_{x_3,3}$. Definiția funcțiilor de apartenență de tip trapezoidal este:

$$\mu_{LT_{x_3,j}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_{x_3,j}, \\ 1 + \frac{x - b_{x_3,j}}{b_{x_3,j} - a_{x_3,j}}, & x \in [a_{x_3,j}, b_{x_3,j}), \\ 1, & x \in [b_{x_3,j}, c_{x_3,j}), \\ 1 - \frac{x - c_{x_3,j}}{d_{x_3,j} - c_{x_3,j}}, & x \in [c_{x_3,j}, d_{x_3,j}), \\ 0, & x \geq d_{x_3,j}, \end{cases} \quad (4.27)$$

$$a_{x_3,j} < b_{x_3,j} \leq c_{x_3,j} < d_{x_3,j}, \quad j \in \{1,3\},$$

și celui de-al doilea termen lingvistic îi corespunde o funcție de apartenență de tip gaussian:

$$\mu_{LT_{x_3,2}}(x_3) = \exp\left[-\frac{(x_3 - a_{x_3,2})^2}{2b_{x_3,2}^2}\right]. \quad (4.28)$$

Tabelul 4.4.2. Valorile modale ale termenilor lingvistici de intrare.

Termeni lingvistici $LT_{x_1,j}, j = 1 \dots 3$	Funcții de apartenență de tip triunghiular		
	$a_{x_1,j}$	$b_{x_1,j}$	$c_{x_1,j}$
$TL_{x_1,1}$	-0.2	-0.1	0
$TL_{x_1,2}$	-0.1	0	0.1
$TL_{x_1,3}$	0	0.1	0.2

Parametrii $a_{x_3,2}$, $b_{x_3,3}$ și $c_{x_3,1}$ sunt variabili. Parametrii $a_{x_3,j}, j \in \{1,3\}$, $b_{x_3,j}, j \in \{1,3\}$, $b_{x_3,2}$, $c_{x_3,j}, j \in \{1,3\}$, și $d_{x_3,j}, j \in \{1,3\}$ sunt fiși. Parametrii funcțiilor de apartenență de intrare ale mulțimilor fuzzy aferente termenilor lingvistici ai variabilelor de intrare x_1 și x_3 sunt prezentați în tabelul 4.4.3 [Dav12c].

Tabelul 4.4.3. Parametrii termenilor lingvistici de tip trapezoidal.

Termeni lingvistici, $LT_{x_3,j}, j = \{1,3\}$	Funcții de apartenență de tip trapezoidal			
	$a_{x_3,j}, j = \{1,3\}$	$b_{x_3,j}, j = \{1,3\}$	$c_{x_3,j}, j = \{1,3\}$	$d_{x_3,j}, j = \{1,3\}$
$TL_{x_3,1}$	-8.757	-8.757	-1.251	4.3785
$TL_{x_3,3}$	4.3785	11.259	18.765	18.765

Cele nouă puncte de funcționare $A_j(x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40})$, $j = 1 \dots 9$, au coordonatele prezentate în tabelul 4.4.4.

Tabelul 4.4.4. Coordonatele punctelor de funcționare.

Coordonate	Puncte de funcționare								
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
x_{10}	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.007	0.008	0.009
x_{20}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x_{30}	0.285	0.6	0.3	0.6	0.3	0.285	0.3	0.285	0.6
x_{40}	0	0	0	0	0	0	0	0	0

În pasul 2 al abordării de modelare fuzzy este realizată liniarizarea modelelor neliniare (4.21) în vecinătatea acestor puncte de funcționare. Aceasta duce la nouă modele de stare cu timp continuu.

Baza de reguli a modelelor dinamice fuzzy de tip T-S cu timp discret este obținută prin aplicarea principiului echivalenței modale [Gal95] care garantează echivalența dintre modelele fuzzy și mulțimea celor modelelor de stare neliniare cu timp discret pentru valorile modale ale intrărilor. Prin urmare, baza de reguli completă a modelului fuzzy de tip T-S cu timp discret cu funcțiile de apartenență de intrare descrise anterior, este alcătuită din regulile $R^i, i=1\dots 9$:

$$R^1: \text{IF } x_{1,k} \text{ ISLT}_{x_{1,1}} \text{ AND } x_{3,k} \text{ ISLT}_{x_{3,1}} \text{ THEN } \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_{d,1}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}_{d,1}u_k \\ y_{k,m} = \mathbf{C}_{d,1}\mathbf{x}_k \end{cases}, \quad (4.29)$$

...

$$R^9: \text{IF } x_{1,k} \text{ ISLT}_{x_{1,3}} \text{ AND } x_{3,k} \text{ ISLT}_{x_{3,3}} \text{ THEN } \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_{d,9}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}_{d,9}u_k \\ y_{k,m} = \mathbf{C}_{d,9}\mathbf{x}_k \end{cases},$$

în care k este indicele intervalului de eșantionare curent, i este indicele regulii curente și j este indicele termenului lingvistic curent. De exemplu, matricele modelelor de stare din concluziile regulilor R^1 și R^9 sunt:

$$\mathbf{A}_{d,1} = \begin{bmatrix} 0.9982 & 0.0047 & -0.00009 \\ -1.482 & 0.8350 & -0.02977 \\ 99.96 & 6.488 & 0.3488 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{d,1} = \begin{bmatrix} -0.00006 \\ -0.03263 \\ 1.24 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{d,1} = [1 \ 0 \ 0], \quad (4.30)$$

$$\mathbf{A}_{d,9} = \begin{bmatrix} 1.002 & 0.0044 & -0.00011 \\ -0.1642 & 0.679 & -0.03415 \\ 90.37 & 7.633 & 0.09682 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{d,9} = \begin{bmatrix} -0.00012 \\ -0.06461 \\ 1.472 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{d,9} = [1 \ 0 \ 0].$$

În mecanismul de inferență sunt folosiți operatorii SUM și PROD. În modulul de defuzzificare este folosită metoda mediei ponderate.

Algoritmul SA este aplicat în pasul 4 al abordării de modelare fuzzy pentru rezolvarea problemei de optimizare definite în relația (4.1). În acest context este implementat algoritmul SA prezentat în subcapitolul 3.1 al tezei urmând pașii descriși acolo și folosind următoarele relații dintre funcția obiectiv și funcția de evaluare (fitness) și respectiv dintre vectorul parametrilor din relația (4.1) și vectorul parametrilor din algoritmul SA:

$$J(\mathbf{p}) = f(\boldsymbol{\psi}), \quad J(\mathbf{p}) = f(\varphi), \quad \mathbf{p} = \boldsymbol{\psi}, \quad \mathbf{p} = \varphi. \quad (4.31)$$

Algoritmul SA pornește cu vectorul parametrilor \mathbf{p} al modelului fuzzy [Dav12c]:

$$\mathbf{p} = [-0.1 \ 0 \ 0.1 \ -1.251 \ 4.3785 \ 11.26]^T \quad (4.32)$$

la temperatura inițială $\theta_0 = 1$, cu ratele de succes și rejecție maxime stabilite la valorile $r_{r \max} = 1000$ și respectiv $s_{r \max} = 50$ și găsește vectorul soluției finale \mathbf{p}^* după 176 iterații la o temperatură de $\theta_{176} = 9.82741 \cdot 10^{-9}$:

$$\mathbf{p}^* = [-0.0751 \ 0.0001 \ 0.0104 \ -1.1094 \ 5.9424 \ 14.3821]^T. \quad (4.33)$$

Au fost efectuate experimente pentru validarea acestui model fuzzy de tip T-S și a abordării de modelare fuzzy. A fost antrenat modelul fuzzy de tip T-S, după cum este descris în [Dra11b], [Dra13] folosind un semnal de comandă u generat astfel încât să acopere diferite domenii de amplitudine mare și frecvență mare (HAHF). Altfel spus, a fost efectuată antrenarea modelelor. Au fost efectuate, apoi, alte experimente, de testare, prin aplicarea altui semnal de comandă u , pentru a demonstra îmbunătățirea semnificativă a performanțelor modelului fuzzy de tip T-S prin aplicarea algoritmului SA din punctul de vedere al reducerii erorilor de modelare.

În fig. 4.4.7 este prezentată evoluția funcției obiective în funcție de numărul de iterații. Fig. 4.4.7 arată că soluția problemei de optimizare (4.1) obținute prin algoritmul SA asigură o scădere semnificativă a valorii funcției obiectiv. Deși nu poate fi garantată atingerea minimumului funcției obiectiv, fig. 4.4.7 sugerează posibilitatea de îmbunătățire prin mărirea ulterioară a numărului de iterații.

În subcapitolul 4.3 este prezentată acordarea optimală a parametrilor funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelelor fuzzy pentru un sistem anti-blocaj al roților.

În subcapitolul 4.4 sunt prezentate contribuțiile autorului oferite în cadrul capitolul 4.

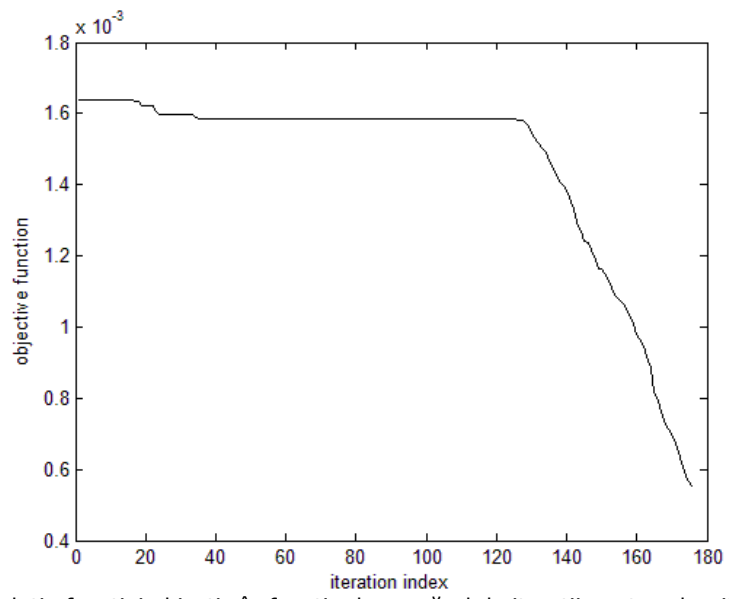


Fig. 4.4.7. Evoluția funcției obiectiv în funcție de numărul de iterații pentru algoritmului SA.

5. CONTRIBUȚII, DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE ȘI DISEMINAREA REZULTATELOR

5.1 Contribuții

Noile contribuții propuse în cadrul acestei teze sunt extrase și prezentate în continuare conform formulărilor din subcapitolele de concluzii aferente capitolelor 2, 3 și 4:

- Contribuții din **capitolul 2**:

1. Modele noi cu timp discret ale reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S caracterizate prin manipularea elementelor dinamice în structura acestor reguletoare pentru definirea a două variabile de stare.

2. Modele noi de sensibilitate cu timp discret ale sistemelor de reglare fuzzy în raport cu doi parametri ai procesului condus reprezentat de o clasă de servosisteme neliniare. Sistemele de reglare fuzzy includ reguletoare fuzzy-PI de tip T-S. Clasa de servosisteme neliniare este structurată ca o conexiune serie de elemente liniare de ordinul doi cu dinamică și componentă integratoare, cu neliniaritate statică de tip saturație și zonă moartă plasată pe intrarea procesului.

3. O nouă metodă de proiectare dedicată unor reguletoare simple fuzzy-PI de tip T-S pentru servosisteme cu sensibilitate parametrică redusă, și anume cu sensibilitate redusă în raport cu coeficientul de transfer al procesului și sensibilitate redusă în raport cu constanta de timp mică a procesului. Metoda de proiectare asigură acordarea parametrilor reguletoarelor fuzzy prin rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare pe baza algoritmilor inspirați din natură.

- Contribuții din **capitolul 3**:

1. Aplicarea originală a algoritmului SA pentru rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare pentru acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S dedicate reglării unei clase de servosisteme neliniare.

2. Aplicarea originală a algoritmului PSO pentru rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare pentru acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S dedicate reglării unei clase de servosisteme neliniare.

3. Aplicarea originală a algoritmului GSA pentru rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare pentru acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S dedicate reglării unei clase de servosisteme neliniare.

4. Aplicarea originală a algoritmului hibrid PSO-GSA pentru rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare pentru acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S dedicate reglării unei clase de servosisteme neliniare.

5. Aplicarea originală a algoritmului CSS pentru rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare pentru acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S dedicate reglării unei clase de servosisteme neliniare.

6. O nouă clasă de algoritmi adaptivi GSA cu capabilități îmbunătățite de explorare și exploatare inspirați de modelul de învățare 5E folosit în educație. Algoritmii adaptivi GSA au fost dezvoltați pornind de la varianta standard a GSA, iar cele trei funcționalități noi sunt:

- adaptarea a două legi de depreciere a constantei gravitaționale la indicele iterației;
- adaptarea unui parametru în suma ponderată a tuturor forțelor exercitate de agenți la indicele iterației;
- reinițializarea la fiecare iterație a algoritmului GSA adaptiv a poziției celui mai slab performant agent la poziția celui mai performant agent.

7. Aplicarea originală a algoritmului GSA adaptiv pentru rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare pentru acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S dedicate reglării unei clase de servosisteme neliniare.

8. O nouă clasă de algoritmi adaptivi CSS cu capabilități îmbunătățite de explorare și exploatare inspirați de modelul de învățare 5E folosit în educație. Algoritmii adaptivi CSS au fost dezvoltați pornind de la varianta standard a CSS, iar cele două funcționalități noi sunt:

- adaptarea parametrilor accelerației, vitezei și distanței de separare la indicele iterației;
- substituirea sarcinii cu cea mai slabă valoare a funcției obiectiv cu poziția sarcinii cu cea mai performantă valoare a funcției obiectiv.

9. Aplicarea originală a algoritmului CSS adaptiv pentru rezolvarea a patru tipuri de probleme de optimizare pentru acordarea optimală a parametrilor reguletoarelor fuzzy-PI de tip T-S dedicate reglării unei clase de servosisteme neliniare.

10. Definirea a trei indicatori de performanță (calitate) originali pentru evaluarea calității soluțiilor obținute pe baza algoritmilor inspirați din natură:

- valoarea medie a fiecărei funcții obiectiv;
- viteza de convergență;

- rata de precizie.
11. Evaluarea performanțelor (calității) algoritmilor de optimizare inspirați din natură bazată pe trei indicatori originali luând în considerare un număr de rulări (cinci în cadrul acestei teze) pentru fiecare algoritm de optimizare inspirat din natură.
 12. Validarea noilor rezultate prin simulări folosind modele de sisteme de reglare fuzzy și prin experimente efectuate pe un stand de laborator care conține un servosistem neliniar.
 - Contribuții din **capitolul 4**:
 1. O nouă abordare de modelare fuzzy care asigură acordarea optimală a unei părți din parametrii funcțiilor de apartenență de intrare aferente modelelor fuzzy de tip T-S. Această abordare se sprijină pe definirea unor problemele de optimizare, care sunt rezolvate ulterior cu ajutorul algoritmilor inspirați din natură.
 2. O nouă abordare de modelare fuzzy a unui sistem anti-blocaj al roților folosind parametri variabili ai funcțiilor de apartenență de intrare optimizați cu ajutorul algoritmului Simulated Annealing.
 3. O nouă abordare de modelare fuzzy a unui sistem cu levitație magnetică folosind parametri variabili ai funcțiilor de apartenență de intrare optimizați cu ajutorul algoritmului Simulated Annealing.
 4. Noi modele fuzzy de tip T-S cu timp discret pentru sisteme anti-blocaj al roților și pentru sisteme cu levitație magnetică, deduse pe baza principiului echivalenței modale, la care modelele de stare locale liniarizate și apoi discretizate ale procesului condus sunt plasate în concluziile regulilor.

5.2 Direcții viitoare de cercetare

Pornind de la noile contribuții prezentate în subcapitolul anterior, cercetările efectuate în cadrul acestei teze pot fi extinse în următoarele direcții:

- Extinderea soluțiilor prezentate la alte probleme de optimizare bazate pe sensibilitate redusă, formulate în domeniul timp sau în domeniul frecvență;
- Modelarea fuzzy a proceselor dinamice neliniare prin optimizare parametrică bazată pe noi algoritmi inspirați din natură;
- Extinderea metodei de acordare a reguletoarelor fuzzy prin includerea condițiilor de stabilitate ca restricții de tip inegalitate;
- Introducerea și extinderea aplicării logicii fuzzy în acordarea parametrilor algoritmilor inspirați din natură pentru a limita gradele de libertate reprezentate de parametrii aleatori ai acestor algoritmi;
- Dezvoltarea de noi soluții bazate pe hibridizarea algoritmilor pentru evitarea dezavantajelor prezente în variantele standard;
- Folosirea abordării de modelare propuse pentru procese în cadrul diverselor aplicații industriale;
- Extinderea abordării de modelare la acordarea optimală a parametrilor modelelor fuzzy incluși în alte module ale structurii modelului fuzzy (baza de reguli, mecanismul de inferență și/sau modulul de defuzificare).

5.3 Diseminarea rezultatelor

Rezultatele și contribuțiile cercetării prezentate în cadrul tezei au fost diseminate prin publicarea unui număr de **32** de lucrări, organizate astfel:

- **8 lucrări publicate** în reviste cu factor de impact indexate în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior **ISI Web of Knowledge**), cu **un factor de impact cumulat de 27.16** conform Journal Citation Reports (JCR) din 2013 publicat de Thompson Reuters în 2014.
- **7 lucrări publicate** în volume de conferințe sau în capitole în cărți indexate în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior **ISI Web of Knowledge** sau **ISI Proceedings**).
- **2 lucrări publicate** în revistă indexată în baza de date internațională **SCOPUS**.
- **8 lucrări publicate** în volume de conferințe indexate în bazele de date internaționale **IEEE Xplore**, **INSPEC**, **SCOPUS** și/sau **DBLP**.
- **4 capitole în cărți** publicate în Springer-Verlag sau Atlantis Press și indexate în baza de date **Springer Link**, dintr-un total de 7 astfel de capitole, 3 fiind indexate

în Thomson Reuters Web of Science (cu numele anterior ISI Web of Knowledge sau ISI Proceedings).

- **2 lucrări publicate** în reviste internaționale neindexate.
- **1 lucrare publicată** în volum de conferință neindexată.

Autorul acestei teze este **prim autor** la **9** din aceste lucrări.

În continuare este prezentată lista lucrărilor publicate care sprijină rezultatele și contribuțiile din cadrul tezei:

1. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Fuzzy control systems with reduced parametric sensitivity based on simulated annealing, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 8, pp. 3049-3061, 2012, impact factor (IF) = 5.165, IF according to 2013 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2014 = **6.500**, indexată în **Thomson Reuters Web of Science (cotată ISI)**.
2. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, S. Preitl, J. Fodor, Evolutionary optimization-based tuning of low-cost fuzzy controllers for servo systems, *Knowledge-Based Systems (Elsevier Science)*, vol. 38, pp. 74-84, 2013, impact factor (IF) = 3.058, IF according to 2013 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2014 = **3.058**, indexată în **Thomson Reuters Web of Science (cotată ISI)**.
3. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E.M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Novel adaptive gravitational search algorithm for fuzzy controlled servo systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 4, pp. 791-800, 2012, impact factor (IF) = 3.381, IF according to 2013 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2014 = **8.785**, indexată în **Thomson Reuters Web of Science (cotată ISI)**.
4. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, S. Preitl, A. S. Paul, Gravitational search algorithm-based tuning of fuzzy control systems with a reduced parametric sensitivity, in: *Soft Computing in Industrial Applications*, editors: A. Gaspar-Cunha, R. Takahashi, G. Schaefer, L. Costa, *Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol. 96, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 141-150, 2011, indexată în **Thomson Reuters Web of Science (cu numele anterior ISI Web of Knowledge sau ISI Proceedings)**.
5. **R.-C. David**, R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, S. Preitl, Gravitational search algorithm-based design of fuzzy control systems with a reduced parametric sensitivity, *Information Sciences (Elsevier Science)*, vol. 247, pp. 154-173, 2013, impact factor (IF) = 3.893, IF according to 2013 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2014 = **3.893**.
6. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, St. Preitl. M.-B. Radac, Novel Adaptive Charged System Search Algorithm for Optimal Tuning of Fuzzy Controllers, *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 4, part 1, pp. 1168-1175, 2014, impact factor (IF) = 1.965, IF according to 2013 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2014 = **1.965**, indexată în **Thomson Reuters Web of Science (cotată ISI)**.
7. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Fuzzy logic-based adaptive gravitational search algorithm for optimal tuning of fuzzy controlled servo systems, *IET Control Theory and Applications*, vol. 7, no. 1, pp. 99-107, 2013, impact factor (IF) = 1.844, IF according to 2013 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2014 = **1.844**, indexată în **Thomson Reuters Web of Science (cotată ISI)**.
8. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Experiments in fuzzy controller tuning based on an adaptive gravitational search algorithm, *Proceedings of the Romanian Academy, Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science (Editura Academiei Române, Bucharest)*, vol. 14, no. 4, pp. 360-367, 2013, impact factor (IF) = 1.115, IF according to 2013 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2014 = **1.115**, indexată în **Thomson Reuters Web of Science (cotată ISI)**.
9. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, S. Preitl, Adaptive GSA-Based Optimal Tuning of PI Controlled Servo Systems With Reduced Process Parametric Sensitivity, Robust Stability and Controller Robustness, *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 44, no. 11, pp. 1997-2009, 2014, impact factor (IF) = 0.000, IF according to 2013 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2014 = **0.000**, indexată în **Thomson Reuters Web of Science (cotată ISI)**.
10. R.-E. Precup, **R.-C. David**, S. Preitl, E. M. Petriu, J. K. Tar, Optimal control systems with reduced parametric sensitivity based on particle swarm optimization and simulated annealing, in: *Intelligent Computational Optimization in Engineering Techniques and*

- Applications, M. Köppen, G. Schaefer and A. Abraham, *Studies in Computational Intelligence*, vol. 366 (Springer-Verlag), pp. 177-207, 2011, indexată în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior ISI Web of Knowledge sau **ISI Proceedings**).
11. **R.-C. David**, M.-B. Rădac, S. Preitl, J. K. Tar, Particle swarm optimization-based design of control systems with reduced sensitivity, *Proceedings of 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2009)*, Timisoara, Romania, pp. 491-496, 2009, indexată în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior ISI Web of Knowledge sau **ISI Proceedings**).
 12. C.-A. Dragoș, R.-E. Precup, **R.-C. David**, S. Preitl, A.-I. Stînean, E. M. Petriu, Simulated annealing-based optimization of fuzzy models for magnetic levitation systems, *Proceedings of 2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting IFSA/NAFIPS 2013*, Edmonton, AB, Canada, pp. 286-291, 2013, indexată în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior ISI Web of Knowledge sau **ISI Proceedings**).
 13. R.-E. Precup, S. V. Spătaru, M.-B. Rădac, E. M. Petriu, S. Preitl, C.-A. Dragoș, **R.-C. David**, Experimental results of model-based fuzzy control solutions for a laboratory antilock braking system, in: *Human-Computer Systems Interaction: Backgrounds and Applications 2, Part 2*, Z. S. Hippe, J. L. Kulikowski and T. Mroczek, Eds., *Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol. 99, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 223-234, 2012, indexată în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior ISI Web of Knowledge sau **ISI Proceedings**).
 14. R.-E. Precup, **R.-C. David**, A.-I. Stînean, M.-B. Rădac, E. M. Petriu, Adaptive Hybrid Particle Swarm Optimization-Gravitational Search Algorithm for Fuzzy Controller Tuning, *Proceedings of 2014 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications INISTA 2014*, Alberobello, Italy, pp. 14-20, 2014, indexată în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior ISI Web of Knowledge sau **ISI Proceedings**).
 15. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Gravitational search algorithms in fuzzy control systems tuning, *Proceedings of 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, pp. 13624-13629, 2011, indexată în **SCOPUS**.
 16. **R.-C. David**, R.-E. Precup, E. M. Petriu, C. Purcaru, S. Preitl, PSO and GSA algorithms for fuzzy controller tuning with reduced process small time constant sensitivity, *Proceedings of 2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC 2012)*, Sinaia, Romania, 6 pp., 2012, indexată în **IEEE Xplore**, **INSPEC**, **SCOPUS**.
 17. **R.-C. David**, R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, C. Purcaru, C.-A. Dragoș, S. Preitl, Adaptive gravitational search algorithm for PI-fuzzy controller tuning, *Proceedings of 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2012)*, Rome, Italy, vol. 1, pp. 136-141, 2012, indexată în **SCOPUS**, **DBLP**.
 18. **R.-C. David**, R.-E. Precup, S. Preitl, J. K. Tar, J. Fodor, Parametric sensitivity reduction of PI-based control systems by means of evolutionary optimization algorithms, *Proceedings of 6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2011)*, Timisoara, Romania, pp. 241-246, 2011, indexată în **IEEE Xplore**, **INSPEC**, **SCOPUS**.
 19. **R.-C. David**, R.-E. Precup, S. Preitl, J. K. Tar, J. Fodor, Three evolutionary optimization algorithms in PI controller tuning, in: *Applied Computational Intelligence in Engineering and Information Technology*, editors: R.-E. Precup, S. Kovacs, S. Preitl, E. M. Petriu, *Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, vol. 1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 95-106, 2012, indexată în **Springer Link**.
 20. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Charged System Search Algorithms for Optimal Tuning of PI Controllers, *Proceedings of 1st IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control (CESCIT 2012)*, pp. 115-120, 2012, indexată în **SCOPUS**.
 21. **R.-C. David**, R.-E. Precup, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, L.-O. Fedorovici, Adaptive Evolutionary Optimization Algorithms for Simple Fuzzy Controller Tuning Dedicated to Servo Systems, in: *Fuzzy Modeling and Control: Theory and Applications*, F. Matia, G. N. Marichal and E. Jimenez, Eds., Atlantis Computational Intelligence Systems, vol. 9, Atlantis Press and Springer International Publishing, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, pp. 159-173, 2014, indexată în **Springer Link**.
 22. R.-E. Precup, **R.-C. David**, S. Preitl, E. M. Petriu, Design aspects of optimal PI controllers with reduced sensitivity for a class of servo systems using PSO algorithms,

- Facta Universitatis Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2009.
23. R.-E. Precup, **R.-C. David**, E. M. Petriu, S. Preitl, *Optimal fuzzy controllers tuned by charged system search algorithms*, 2011 Online Conference on Soft Computing in Industrial Applications (WSC 16), 10 pp., 2011.
 24. **R.-C. David**, R.-B. Grad, R.-E. Precup, M.-B. Rădac, C.-A. Dragoș, E. M. Petriu, *An approach to fuzzy modeling of anti-lock braking systems*, in: *Soft Computing in Industrial Applications*, V. Snasel, P. Kromer, M. Koppen and G. Schaefer, Eds., *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer International Publishing, Berlin, Heidelberg, vol. 223, pp. 83-93, 2014, indexată în **Springer Link**.
 25. **R.-C. David**, C.-A. Dragoș, R.-G. Bulzan, R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, *An approach to fuzzy modeling of magnetic levitation systems*, *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 9, no. A12, pp. 1-18, 2012, indexată în **SCOPUS**.
 26. A.-S. Paul, R.-E. Precup, C. Pozna, **R.-C. David**, *nDSP: A platform for audiophile software audio processing*, *Proceedings of IEEE International Joint Conferences on Computational Cybernetics and Technical Informatics (ICCC-CONTI 2010)*, Timisoara, Romania, pp. 431-436, 2010, indexată în **IEEE Xplore**, **INSPEC**, **SCOPUS**.
 27. C.-A. Dragoș, R.-E. Precup, E. M. Petriu, M. L. Tomescu, S. Preitl, **R.-C. David**, M.-B. Rădac, *2-DOF PI-fuzzy controllers for a magnetic levitation system*, *Proceedings of 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2011)*, Noordwijkerhout, The Netherlands, vol. 1, pp. 111-116, 2011, indexată în **SCOPUS**, **DBLP**.
 28. R.-E. Precup, E. M. Petriu, C.-A. Dragoș, **R.-C. David**, *Stability analysis results concerning the fuzzy control of a class of nonlinear time-varying systems*, *Theory and Applications of Mathematics & Computer Science*, vol. 1, no. 1, pp. 2-10, 2011.
 29. L.-O. Fedorovici, R.-E. Precup, F. Drăgan, **R.-C. David**, C. Purcaru, *Embedding gravitational search algorithms in convolutional neural networks for OCR applications*, *Proceedings of IEEE 7th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2012)*, Timisoara, Romania, pp. 125-130, 2012, indexată în **IEEE Xplore**, **INSPEC**, **SCOPUS**, **DBLP**.
 30. C. Purcaru, R.-E. Precup, D. Iercan, L.-O. Fedorovici, **R.-C. David**, *Hybrid PSO-GSA Robot Path Planning Algorithm in Static Environments with Danger Zones*, *Proceedings of 2013 17th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC 2013)*, Sinaia, Romania, 2013, pp. 434-439, indexată în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior **ISI Web of Knowledge** sau **ISI Proceedings**).
 31. C. Purcaru, R.-E. Precup, D. Iercan, L.-O. Fedorovici, **R.-C. David**, F. Drăgan, *Optimal robot path planning using gravitational search algorithm*, *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 9, no. 13 S, pp. 1-20, 2013, indexată în **SCOPUS**.
 32. L.-O. Fedorovici, R.-E. Precup, **R.-C. David**, F. Drăgan, *GSA-Based Training of Convolutional Neural Networks for OCR Applications*, in: *Computational Intelligence Systems in Industrial Engineering*, C. Kahraman, Ed., *Atlantis Computational Intelligence Systems*, vol. 6, Atlantis Press and Springer-Verlag, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, pp. 481-504, 2012, indexată în **Springer Link**.

Autorul acestei teze este prim autor al 9 dintre cele 32 de lucrări publicate.

Lucrarea menționată în cadrul poziției 23 din listă a fost distinsă cu premiul "**Best paper award**" la 16th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC16 (Loughborough University, UK, 2011).

Lucrările publicate în lista mai sus menționată au primit un număr total de **124 citări independente** (sunt excluse autocitările tuturor coautorilor).

Factorul de impact cumulat ale acestor citări independente este de **116.069** conform Journal Citation Reports (JCR) din 2013 publicat de Thomson Reuters în 2014. **54** din aceste citări sunt indexate în **Thomson Reuters Web of Science** (cu numele anterior **ISI Web of Knowledge** sau **ISI Proceedings**, **42** dintre aceste lucrări fiind publicate în reviste și **12** în volume de conferințe) și **28** de citări sunt indexate în bazele de date internaționale **IEEE Xplore**, **INSPEC**, **SCOPUS** și/sau **DBLP**.

6. BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [Alm10] M. Almaraashi, R. John, S. Coupland, A. Hopgood, Time series forecasting using a TSK fuzzy system tuned with simulated annealing, *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2010)*, Barcelona, Spain, pp. 1–6, 2010.
- [Anh12] H. P. H. Anh, C. T. Lam, P. H. Lam, Inverse adaptive fuzzy model identification of the 2-axes PAM robot arm, *Proceedings of 2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS 2012)*, Saigon, Vietnam, pp. 334–339, 2012.
- [Ara03] M. Araki, H. Taguchi, Two-degree-of-freedom PID controllers, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 401–411, Dec. 2003.
- [Ast95] K. J. Åström, T. Hägglund, *PID Controllers Theory: Design and Tuning*, Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.
- [Bal06] S. Balci, J. Cakiroglus, C. Tekkayas, Engagement, exploration, explanation, extension, and evaluation (5E) learning cycle and conceptual change text as learning tools, *Biochemistry and Molecular Biology Education*, vol. 34, no. 3, pp. 199–203, May 2006.
- [Bla11] S. Blažič, A novel trajectory-tracking control law for wheeled mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 11, pp. 1001–1007, Dec. 2011.
- [Bla13] S. Blažič, D. Matko, T. Rodič, D. Dovžan, G. Mušič, G. Klančar, The design of observers for formation-flying control, *Acta Astronautica*, vol. 82, no. 1, pp. 60–68, Jan. 2013.
- [Bod05] M. Bodur, A. Acan, T. Akyol, Fuzzy system modeling with the genetic and differential evolutionary optimization, *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce*, Vienna, Austria, vol. 1, pp. 432–438, 2005.
- [Byb02] R. W. Bybee (Ed.), *Learning Science and the Science of Learning: Science Educators' Essay Collection*, NSTA Press, Arlington, VA, 2002.
- [Cab06] C. Cabrita, J. Botzheim, T.D. Gedeon, A.E. Ruano, L.T. Koczy, C. Fonseca, Bacterial memetic algorithm for fuzzy rule base optimization, *Proceedings of 2006 World Automation Congress (WAC '06)*, Budapest, Hungary, pp. 1–6, 2006.
- [Car05] S. Caraman, M. Barbu, E. Ceangă, Robust multimodel control using QFT techniques of a wastewater treatment process, *Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 10–17, June 2005.
- [Cha12] Y.-H. Chang, C.-W. Tao, H.-W. Lin, J.-S. Taur, Fuzzy sliding-mode control for ball and beam system with fuzzy ant colony optimization, *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 3, pp. 3624–3633, Feb. 2012.
- [Cha14] W.-J. Chang, C.-P. Kuo, C.-C. Ku, Intelligent fuzzy control with imperfect premise matching concept for complex nonlinear multiplicative noised systems, *Neurocomputing*, DOI: 10.1016/j.neucom.2014.11.065, Dec. 2014.
- [Che08] K.-H. Cheng, Hybrid learning-based neuro-fuzzy inference system: A new approach for system modeling, *International Journal of Systems Science*, vol. 39, no. 6, pp. 583–600, June 2008.
- [Cor14] J. Cortés-Romero, G. A. Ramos, H. Coral-Enriquez, Generalized proportional integral control for periodic signals under active disturbance rejection approach, *ISA Transactions*, vol. 53, no. 6, pp. 1901–1909, Nov. 2014.
- [Dan05] D. Danciu, V. Răsvan, Stability results for cellular neural networks with time delays, in: *Computational Intelligence and Bioinspired Systems*, J. Cabestany, A. Prieto and F. Sandoval, Eds., *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3512, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 366–373, 2005.
- [Dan11] D. Danciu, V. Răsvan, Systems with slope restricted nonlinearities and neural networks dynamics, in: *Advances in Computational Intelligence*, J. Cabestany, I. Rojas and G. Joya, Eds., *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6692, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 565–572, 2011.
- [Dav12c] R.-C. David, C.-A. Dragoș, R.-G. Bulzan, R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, An approach to fuzzy modeling of magnetic levitation systems, *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 9, pp. 1–18, Oct. 2012.
- [Dav13] R.-C. David, R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, S. Preitl, Gravitational search algorithm-based design of fuzzy control systems with a reduced parametric sensitivity, *Information Sciences*, vol. 247, pp. 154–173, Oct. 2013.
- [Dra11b] C.-A. Dragoș, R.-E. Precup, E. M. Petriu, M. L. Tomescu, S. Preitl, R.-C. David, M.-B. Rădac, 2-DOF PI-fuzzy controllers for a magnetic levitation system, *Proceedings of 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2011)*, Noordwijkerhout, The Netherlands, vol. 1, pp. 111–116, 2011.

- [Dra13] C.-A. Dragoş, R.-E. Precup, R.-C. David, S. Preitl, A.-I. Stînean, E. M. Petriu, Simulated annealing-based optimization of fuzzy models for magnetic levitation systems, *Proceedings of 2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS 2013)*, Edmonton, AB, Canada, pp. 286–291, 2013.
- [Fen06] G. Feng, A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 14, no. 5, pp. 676–697, Oct. 2006.
- [Fer13] Feriyonika, G. Dewantoro, Fuzzy sliding mode control for enhancing injection velocity performance in injection molding machine, *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 10, no. S13, pp. 75–87, March 2013.
- [Fil08] F.-G. Filip, D. Popescu, M. Mateescu, Optimal decisions for complex systems - Software packages, *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 76, no. 5–6, pp. 422–429, Jan. 2008.
- [Fil09] F.-G. Filip, K. Leiviskä, Large-scale complex systems, in: *Springer Handbook of Automation*, S. Y. Nof, Ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 619–638, 2009.
- [Gal95] S. Galichet, L. Foulloy, Fuzzy controllers: synthesis and equivalences, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 140–148, May 1995.
- [Guo07] Y. Guo, J. Lu, T. Zhang, K. Wu, A multi-objective optimizing control method for boiler-turbine coordinated control, *Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation ICMA 2007*, Harbin, China, pp. 3700–3705, 2007.
- [Hol05] D. Holliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 7th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2005.
- [Hus13] P. Husek, O. Cerman, Fuzzy model reference control with adaptation of input fuzzy sets, *Knowledge-Based Systems*, vol. 49, pp. 116–122, Sep. 2013.
- [Jaj11] H. R. I. Jajarmi, A. Mohamed, H. Shareef, GSA-FL controller for three phase active power filter to improve power quality, *Proceedings of 2011 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA 2011)*, Shiraz, Iran, pp. 417–422, 2011.
- [Joe13] E. Joelianto, D. C. Anura, M. Priyanto, ANFIS – hybrid reference control for improving transient response of controlled systems using PID controller, *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 10, no. S13, pp. 88–111, March 2013.
- [Int07b] *Modular Servo System, User's Manual*, Inteco Ltd., Krakow, Poland, 2007.
- [Int08] *Magnetic Levitation System 2EM (MLS2EM), User's Manual*, Inteco Ltd., Krakow, Poland, 2008.
- [Ise89] R. Isermann, *Digital Control Systems*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1989.
- [Iwa12] M. Iwasaki, K. Seki, Y. Maeda, High-precision motion control techniques: a promising approach to improving motion performance, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 32–40, Mar. 2012.
- [Kan12] N. Kanghyun, H. Fujimoto, Y. Hori, Motion control of electric vehicles based on ro-bust lateral tire force control using lateral tire force sensors, *Proceedings of 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2012)*, Kachsiung, Taiwan, China, pp. 526–531, 2012.
- [Kav10a] A. Kaveh, S. Talatahari, A novel heuristic optimization method: charged system search, *Acta Mechanica*, vol. 213, pp. 267–289, 2010.
- [Kav10b] A. Kaveh, S. Talatahari, Optimal design of truss structures via the charged system search algorithm, *Structural Multidisciplinary Optimization*, vol. 37, no. 6, pp. 893–911, June 2010.
- [Kav10c] A. Kaveh, S. Talatahari, A charged system search with a fly to boundary method for discrete optimum design of truss structures, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, vol. 11, no. 3, pp. 277–293, June 2010.
- [Kav13a] A. Kaveh, A. F. Behnam, Design optimization of reinforced concrete 3D structures considering frequency constraints via a charged system search, *Scientia Iranica*, vol. 20, no. 3, pp. 387–396, June 2013.
- [Ken95a] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN '95)*, Perth, Australia, pp. 1942–1948, 1995.
- [Ken95b] J. Kennedy, R.C. Eberhart, A new optimizer using particle swarm theory, *Proceedings of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS '95)*, Nagoya, Japan, pp 39–43, 1995.
- [Kha10b] M. A. Khanesar, M. Teshnehlab, E. Kayacan, O. Kaynak, A novel type-2 fuzzy membership function: Application to the prediction of noisy data, *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMSA 2010)*, Taranto, Italy, pp. 128–133, 2010.
- [Kir83] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, May 1983.

- [Kum13] R. Kumar Sahu, S. Panda, U. Kumar Rout, DE optimized parallel 2-DOF PID controller for load frequency control of power system with governor dead-band nonlinearity, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 49, pp. 19–33, Jul. 2013.
- [Led07] S. Ledesma, M. Torres, D. Hernández, G. Aviña and G. García, Temperature cycling on simulated annealing for neural network learning, in: *MICAI 2007: Advances in artificial intelligence*, A. Gelbukh and A. F. Kuri Morales, Eds., *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4827, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 161–171, 2007.
- [Li10] T.-H. S. Li, Y.-C. Huang, MIMO adaptive fuzzy terminal sliding-mode controller for robotic manipulators, *Information Sciences*, vol. 180, no. 23, pp. 4641–4660, Dec. 2010.
- [Li12b] C. Li, J. Zhou, B. Fu, P. Kou, J. Xiao, T–S fuzzy model identification with a gravitational search-based hyperplane clustering algorithm, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 305–317, April 2012.
- [Liu10b] G. Liu, J.-H. Han, Y.-B. Wu, M.-J. Liu, An optimal control problem of adaptive fuzzy controllers for fuzzy control systems, *Proceedings of 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA 2010)*, Changsha, Chi-na, vol. 1, pp. 619–622, 2010.
- [Liu12] Y. Liu, L. Yang, H. Duan, Adaptive fuzzy and H_∞ control of robotic manipulators with uncertainties, *Proceedings of 10th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2012)*, Beijing, China, pp. 74–79, 2012.
- [Lu10] Z. Lu, J. Zhang, Y. Chen, T. Zhao, H. Liu, Fuzzy control model and simulation of supply air system in a test rig of low-temperature hot-water radiator system, *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 3, pp. 386–392, March 2010.
- [Mar11] M. Marinaki, Y. Marinakis, G. E. Stavroulakis, Fuzzy control optimized by a multi-objective particle swarm optimization algorithm for vibration suppression of smart structures, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 43, no. 1, pp. 29–42, Jan. 2011.
- [Mir10] S. Mirjalili, S. Z. M. Hashim, A new hybrid PSO-GSA algorithm for function optimization, *Proceedings of 2010 International Conference on Computer and Information Application (ICCIA 2010)*, Tianjin, China, pp. 374–377, 2010.
- [Moh13] B. Mohamed, T. Ahmed, H. Lassad, C. Abdelkader, New Allied Fuzzy C-Means algorithm for Takagi-Sugeno fuzzy model identification, *Proceedings of 2013 International Conference on Electrical Engineering and Software Applications (ICEESA 2013)*, Hammamet, Tunisia, pp. 1–7, 2013.
- [Moh14] A. Mohammadzadeh, O. Kaynak, M. Teshnehlab, Two-mode indirect adaptive control approach for the synchronization of uncertain chaotic systems by the use of a hierarchical interval type-2 fuzzy neural network, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 5, pp. 1301–1312, Oct. 2014.
- [Nik13] T. Niknam, M. R. Narimani, R. Azizipanah-Abarghooee, B. Bahmani-Firouzi, Multiobjective optimal reactive power dispatch and voltage control: A new opposition-based self-adaptive modified gravitational search algorithm, *IEEE Systems Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 742–753, Dec. 2013.
- [Oh11] S. K. Oh, H. J. Jang, W. Pedrycz, A comparative experimental study of type-1/type-2 fuzzy cascade controller based on genetic algorithms and particle swarm optimization, *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 9, pp. 11217–11229, Sep. 2011
- [Oni12] E. Onieva, V. Milanés, J. Villagrà, J. Pérez, J. Godoy, Genetic optimization of a vehicle fuzzy decision system for intersections, *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 18, pp. 13148–13157, Dec. 2012.
- [Pan13] H. M. Dubey, M. Pandit, B. K. Panigrahi, M. Udgir, A novel swarm intelligence based gravitational search algorithm for combined economic and emission dispatch problems, in: *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*, B. K. Panigrahi, P. N. Suganthan, S. Das and S. S. Dash, Eds., *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8297, Springer-Verlag, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, pp. 568–579, 2013.
- [Pas04] O. Păstrăvanu, M. Voicu, Necessary and sufficient conditions for componentwise stability of interval matrix systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 6, pp. 1016–1021, June 2004.
- [Pel12] E. Pellegrini, N. Pletschen, S. Spirk, M. Rainer, B. Lohmann, Application of a model-based two-DOF control structure for enhanced force tracking in a semi-active vehicle suspension, *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Control Applications (CCA 2012)*, Dubrovnik, Croatia, pp. 118–123, 2012.
- [Pir13] M. M. Pirbazari, A. Khoei, K. Hadidi, Optimization of inference engine in CMOS analog fuzzy logic controllers, *Proceedings of 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE 2013)*, Mashhad, Iran, pp.1-6, May 2013.
- [Pre97] R.-E. Precup, S. Preitl, Popov-type stability analysis method for fuzzy control systems, *Proceedings of Fifth European Congress on Intelligent Technologies and Soft Computing (EUFIT'97)*, Aachen, Germany, vol. 2, pp. 1306–1310, 1997.

- [Pre06a] R.-E. Precup, S. Preitl, PI and PID controllers tuning for integral-type servo systems to ensure robust stability and controller robustness, *Electrical Engineering*, vol. 88, no. 2, pp. 149–156, Jan. 2006.
- [Pre06b] R.-E. Precup, S. Preitl, Stability and sensitivity analysis of fuzzy control systems. *Mechatronics applications, Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 3, no. 1, pp. 61–76, March 2006.
- [Pre07] R.-E. Precup, S. Preitl, PI-fuzzy controllers for integral plants to ensure robust stability, *Information Sciences*, vol. 177, no. 20, pp. 4410–4429, Oct. 2007.
- [Pre09a] R.-E. Precup, S. Preitl, E. M. Petriu, J. K. Tar, M. L. Tomescu, C. Pozna, Generic two-degree-of-freedom linear and fuzzy controllers for integral processes, *Journal of The Franklin Institute*, vol. 346, no. 10, pp. 980–1003, Dec. 2009.
- [Pre09c] R.-E. Precup, M. L. Tomescu, S. Preitl, Fuzzy logic control system stability analysis based on Lyapunov's direct method, *International Journal of Computers, Communication & Control*, vol. 4, no. 4, pp. 415–426, Dec. 2009.
- [Pre11a] R.-E. Precup, H. Hellendoorn, A survey on industrial applications of fuzzy control, *Computers in Industry*, vol. 62, no. 3, pp. 213–226, Apr. 2011.
- [Pre11c] R.-E. Precup, R.-C. David, S. Preitl, E. M. Petriu, J. K. Tar, Optimal control systems with reduced parametric sensitivity based on particle swarm optimization and simulated annealing, in: *Intelligent Computational Optimization in Engineering Techniques and Applications*, M. Köppen, G. Schaefer and A. Abraham, Eds., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 177–207, 2011.
- [Pre12a] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Novel adaptive gravitational search algorithm for fuzzy controlled servo systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 4, pp. 791–800, Nov. 2012.
- [Pre12b] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Fuzzy control systems with reduced parametric sensitivity based on simulated annealing, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 8, pp. 3049–3061, Aug. 2012.
- [Pre12c] R.-E. Precup, S. V. Spătaru, M.-B. Rădac, E. M. Petriu, S. Preitl, C.-A. Dragoş, R.-C. David, Experimental results of model-based fuzzy control solutions for a laboratory antilock braking system, in: *Human-Computer Systems Interaction: Backgrounds and Applications 2, Part 2*, Z. S. Hippe, J. L. Kulikowski and T. Mroczek, Eds., *Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol. 99, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 223–234, 2012.
- [Pre13a] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, S. Preitl, J. Fodor, Evolutionary optimization-based tuning of low-cost fuzzy controllers for servo systems, *Knowledge-Based Systems*, vol. 38, pp. 74–84, Jan. 2013.
- [Pre13b] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Fuzzy logic-based adaptive gravitational search algorithm for optimal tuning of fuzzy-controlled servo systems, *IET Control Theory and Applications*, vol. 7, no. 1, pp. 99–107, Jan. 2013.
- [Pre13d] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Fuzzy logic-based adaptive gravitational search algorithm for optimal tuning of fuzzy controlled servo systems, *IET Control Theory and Applications*, vol. 7, no. 1, pp. 99–107, Jan. 2013.
- [Pre13e] R.-E. Precup, M.-B. Rădac, M. L. Tomescu, E. M. Petriu, S. Preitl, Stable and convergent iterative feedback tuning of fuzzy controllers for discrete-time SISO systems, *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 188–199, Jan. 2013.
- [Pre14c] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, S. Preitl, M.-B. Rădac, Novel adaptive charged system search algorithm for optimal tuning of fuzzy controllers, *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 4, part 1, pp. 1168–1175, March 2014.
- [Prei99] S. Preitl, R.-E. Precup, An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for PI and PID controllers, *Automatica*, vol. 35, no. 10, pp. 1731–1736, Oct. 1999.
- [Prei06] S. Preitl, R.-E. Precup, J. Fodor, B. Bede, Iterative feedback tuning in fuzzy control systems. Theory and applications, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 3, no. 3, pp. 81–96, Sep. 2006.
- [Prei10] S. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoş, M.-B. Rădac, Tuning of 2-DOF fuzzy PI(D) controllers. Laboratory applications, *Proceedings of 11th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2010)*, Budapest, Hungary, pp. 237–242, 2010.
- [Ras07] E. Rashedi, Gravitational search algorithm, M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, 2007.
- [Ras09] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi, GSA: A gravitational search algorithm, *Information Sciences*, vol. 179, no. 13, pp 2232–2248, 2009.
- [Ras10] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi, BGSA: binary gravitational search algorithm, *Natural Computing*, vol. 9, no.3, pp. 727–745, 2010.
- [Ros00] E. Rosenwasser, R. Yusupov, *Sensitivity of Automatic Control Systems*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.

- [Sch03] B. Schutz, *Gravity from the Ground Up*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [Sil12] A. S. Silveira, J. E. N. Rodríguez, A. A. R. Coelho, Robust design of a 2-DOF GMV controller: A direct self-tuning and fuzzy scheduling approach, *ISA Transactions*, vol. 51, no. 1, pp. 13–21, Jan. 2012.
- [Sti12b] A.-I. Stînean, S. Preitl, R.-E. Precup, E. M. Petriu, C.-A. Dragoş, M.-B. Rădac, Takagi-Sugeno fuzzy control solutions for BLDC drives, *Proceedings of 2012 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2012)*, Sorrento, Italy, pp. 724–729, 2012.
- [Sug99] M. Sugeno, On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 201–224, April 1999.
- [Sy08] M. V. Sy, P. X. Minh, Fuzzy model predictive control using Takagi-Sugeno model, *Proceedings of 2008 International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2008)*, Seoul, Korea, pp. 632–637, 2008.
- [Sza12] T. Szabo, M. Buchholz, K. Dietmayer, Model-predictive control of powershifts of heavy-duty trucks with dual-clutch transmissions, *Proceedings of IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC 2012)*, Maui, HI, USA, pp. 4555–4561, 2012.
- [Val08] Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez, R. G. Harley, Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, no. 2, pp. 171–195, April 2008.
- [Vil12] R. Vilanova, V. M. Alfaro, O. Arrieta, Simple robust autotuning rules for 2-DoF PI controllers, *ISA Transactions*, vol. 51, no. 1, pp. 30–41, Jan. 2012.
- [Vil13] R. Villafuerte, S. Mondie, R. Garrido, Tuning of proportional retarded controllers: Theory and experiments, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 983–990, March 2013.
- [Vis04] A. Visioli, A new design for a PID plus feedforward controller, *Journal of Process Control*, vol. 14, no. 4, pp. 457–463, June 2004.
- [Vra11] D. Vrancic, S. Strmcnik, Design of 2-DOF PI controller for integrating processes, *Proceedings of 8th Asian Control Conference (ASCC 2011)*, Kaohsiung, Taiwan, China, pp. 1135–1140, 2011.
- [Wan10] D. Wang, F. Wang, Design of PDC controller based on T-S fuzzy model for magnetic bearing of high-speed motors, *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT 2010)*, Chengdu, China, vol. 1, pp. 602–606, 2010.
- [Wan12b] H. P. Wang, A. Pinteá, N. Christov, P. Borne, D. Popescu, Recursive model free control of variable speed wind turbine systems, *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Control Applications (CCA 2012)*, Dubrovnik, Croatia, pp. 1541–1546, 2012.
- [Wat10] S. K. Wattamwar, S. Weiland, T. Backx, Identification of low-order parameter-varying models for large-scale systems, *Journal of Process Control*, vol. 20, no. 2, pp. 158–172, Feb. 2010.
- [Wu14] W. Yu, W. Chen, Trajectory-shaping guidance with final speed and load factor constraints, *ISA Transactions*, DOI: 10.1016/j.isatra.2014.11.017, Dec. 2014.
- [Yon11] Yongzhi, J., Kunlun, Z., Jian, X., Modeling of gap sensor for high-speed Maglev train based on fuzzy neural network, *Proceedings of Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2011)*, Shanghai, China, vol. 1, pp. 650–654, 2011.
- [Zhe11] T. Zheng, F. Ma, K. Zhang, Estimation of reference vehicle speed based on T-S fuzzy model, *Proceedings of International Conference on Advanced in Control Engineering and Information Science*, Dali, China, vol. 15, pp. 188–193, 2011.