

Raport științific sintetic

privind implementarea proiectului în perioada octombrie 2011 – octombrie 2016

SINTEZĂ GENERALĂ ASUPRA PROIECTULUI

Echipa de cercetare care a desfășurat activități de cercetare în cadrul proiectului “Noi tehnici de îmbunătățire a performanțelor sistemelor de reglare automată utilizând acordarea parametrilor bazată pe experimente”, contract de finanțare nr. 167 / 05.10.2011, codul de depunere PN-II-ID-PCE-2011-3-0109, <http://www.aut.upt.ro/~rprecup/grant2011.html>, este cea nominalizată în cererea de finanțare: prof.dr.ing. Radu-Emil Precup (director de proiect), prof.dr.ing. Stefan Preitl, conf.dr.ing. Florin Drăgan, ș.l.dr.ing. Daniel Iercan, ș.l.dr.ing. Mircea-Bogdan Rădac, ș.l.dr.ing. Claudia-Adina Dragoș, as.dr.ing. Alexandra-Iulia Stînean, drd.ing. Lucian-Ovidiu Fedorovici.

Acest raport științific sintetic a fost obținut prin concatenarea rezultatelor preluate din următoarele rapoarte științifice care constituie cele patru părți:

- I. Raport științific privind implementarea proiectului în perioada octombrie 2011 – octombrie 2013.
- II. Raport științific privind implementarea proiectului în perioada ianuarie – decembrie 2014.
- III. Raport științific privind implementarea proiectului în perioada ianuarie – decembrie 2015.
- IV. Raport științific privind implementarea proiectului în perioada ianuarie – decembrie 2016.

Principalele rezultate științifice obținute în perioada **2011-2016** sunt:

- **34 lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact, factor de impact cumulat ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2012 Journal Citation Reports = 72.367, scor relativ de influență cumulat = 50.645.**
- **25 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate ISI (ISI Proceedings).**
- **1 lucrare publicată în revistă indexată în baze de date internaționale (Zentralblatt MATH).**
- **22 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, DBLP, Scopus).**
- **8 capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag.**
- **Certificate de apreciere pentru cea mai bună lucrare din sesiunea TT07 1 Control Theory la a 39a Conferință Anuală a IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013 (Viena, Austria).**
- **1 lucrare, http://www.aut.upt.ro/~rprecup/Web_page_Best_paper_award_WSC16.pdf, premiată cu Best Paper Award la 16th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC16 (Loughborough University, UK, 2011).**

Remarci:

1. În acest raport științific figurile și parțial relațiile au fost preluate din lucrările elaborate de echipa de cercetare. Din acest motiv pot apare adnotări în limba engleză și, în unele cazuri, notații puțin diferite de la capitol la capitol. De fiecare dată sunt aduse însă precizările necesare pentru a face interpretările cât mai clare. Mai mult, din motive de asigurare a unei prezentări coerente a ideilor, sunt prezentate detalii privind unele rezultate din anii anteriori, care au stat la baza construirii ideilor și rezultatelor obținute în acest an.

2. Toate lucrările publicate sau în curs de publicare și care conțin rezultate de cercetare obținute în cadrul acestui proiect au menționat sprijinul CNCS – UEFISCDI în secțiunea de Acknowledgements sau în nota de subsol a primei pagini, alături de specificarea codului de depunere a cererii de finanțare.

3. Rezultatele obținute și în **pagina de web a proiectului**, <http://www.aut.upt.ro/~rprecup/grant2011.html>, unde sunt incluse link-uri către lucrările publicate.

4. Primele trei părți ale raportului (I, II și III) au fost publicate și în **pagina de web a proiectului**, <http://www.aut.upt.ro/~rprecup/grant2011.html>. Acesta este motivul pentru care lucrările publicate au factori de impact și scoruri relative de influență la momentul raportării (2013, 2014 respectiv 2015).

5. Rezultatele aferente părții IV a raportului au fost obținute în 2016.

PARTEA I. RAPORT ȘTIINȚIFIC PRIVIND IMPLEMENTAREA PROIECTULUI ÎN PERIOADA OCTOMBRIE 2011 – OCTOMBRIE 2013

A. SINTEZĂ GENERALĂ ASUPRA REZULTATELOR DIN PERIOADA 2011 – 2013

Principalele obiective urmărite în cadrul proiectului au fost îndeplinite conform planului de activitate și sunt grupate în cele ce urmează astfel încât să fie incluse și **activitățile** desfășurate pe toată perioada de execuție a proiectului până în prezent:

Obiective aferente anului 2011

- (1) Analiza, dezvoltarea și implementarea a noi tehnici IFT îmbunătățite. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
 - 1.1. Analiza stadiului actual privind cercetările teoretice și aplicațiile practice ale Iterative Feedback Tuning (IFT) prin studiul critic al posibilităților de îmbunătățire a tehnicilor existente în vederea

generării de tehnici noi de acordare bazată pe experimente a parametrilor reguletoarelor. A fost efectuată analiza menționată și în capitolul B sunt prezentate date sintetice aferente acestei analize, însoțite de bibliografia aferentă prezentată în capitolul G.

- 1.2. Dezvoltarea unor noi tehnici IFT prin îmbunătățirea aspectelor particulare ale tehnicii IFT privind convergența algoritmului de căutare, stabilitatea sistemului de reglare automată de-a lungul iterațiilor, obținerea informațiilor necesare asigurării performanțelor robuste prin extragerea lor din date experimentale obținute în mod neinvaziv și pe cât posibil în jurul unor puncte de funcționare nominale. A fost propusă o soluție nouă de garantare a stabilității sistemelor de reglare automată (SRA) de-a lungul iterațiilor IFT folosind un cadru specific analizei de robustețe a SRA, cu reprezentări de tip incertitudini ale regulatorului supus acordării și folosind teorema aplicărilor mici pentru sisteme în timp discret, cu detalii prezentate în capitolul C.
 - 1.3. Implementarea și validarea noilor tehnici pe echipamente de laborator. Noile tehnici au fost validate atât prin simulări cât și prin experimente efectuate pe un servosistem modular din laboratorul în care își desfășoară activitatea echipa de cercetare.
- (2) Exploatarea și diseminarea rezultatelor. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv, cu rezultatele prezentate în capitolul G, se referă la:
- 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În 2011 a fost publicată lucrarea [R1] în revista IEEE Transactions on Neural Networks (IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems din 2012), cotate ISI, SCI impact factor in 2012 = 3.766, relative influence score = 2.33890214797136.
 - 2.2. Participarea și prezentarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. Drd.ing. Alexandra-Lulia Stînean a prezentat lucrarea [S1] (indexată INSPEC, IEEE Xplore) în cadrul 12th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics CINTI 2011, Budapesta, Ungaria. A fost prezentată lucrarea [P1], care a fost premiată cu Best Paper Award în cadrul 2011 Online Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC 16.

Obiective aferente anului 2012

- (1) Analiza, dezvoltarea și implementarea a noi tehnici experimentale (data-based control, DbC) hibride de acordare a parametrilor reguletoarelor. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
- 1.1. Analiza stadiului actual privind cercetările teoretice și aplicațiile practice ale tehnicilor experimentale (DbC) prin studiul critic al posibilităților de combinare a tehnicilor existente în vederea generării de tehnici noi de acordare bazată pe experimente a parametrilor reguletoarelor. A fost efectuată analiza menționată și în capitolul D sunt prezentate date sintetice aferente acestei analize, însoțite de bibliografia aferentă prezentată în capitolul G.
 - 1.2. Dezvoltarea unor noi tehnici experimentale (DbC) bazate pe îmbunătățirea acordării inițiale și a regimurilor experimentale. A fost propusă o soluție tehnică nouă de optimizare a referinței sistemelor de reglare automată (SRA) utilizând experimente bazate pe Iterative Feedback Tuning (IFT) și Iterative Learning Control (ILC), cu detalii prezentate în capitolul E.
 - 1.3. Implementarea și validarea noilor tehnici pe echipamente de laborator. Noile tehnici au fost validate prin simulări și experimente efectuate pe două procese neliniare, un servosistem modular și un sistem aerodinamic cu două rotoare din laboratorul echipei de cercetare.
- (2) Exploatarea și diseminarea rezultatelor. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv, cu rezultatele prezentate în capitolul G, se referă la:
- 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În 2012 au fost publicate 9 lucrări, [H1], [P1] - [P7], [R1], în reviste cotate ISI cu factor de impact între 3.381 și 0.588, cu scor relativ de influență între 1.48758465011287 și 0.
 - 2.2. Participarea și prezentarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. În 2012 au fost publicate 6 lucrări, [C1], [D1], [P8], [P9], [R2], [R3], în volumele unor conferințe indexate ISI (ISI Proceedings), 10 lucrări, [D2], [F1], [P10], [P11] - [P13], [R4], [S1] - [S3], în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, DBLP), 3 capitole de carte, [D3], [F2], [P14], în editura Springer-Verlag.

Obiective aferente anului 2013

- (1) Dezvoltarea unor noi tehnici de acordare optimală a unor structuri cu reguletoare convenționale. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
- 1.1. Dezvoltarea de tehnici de acordare optimală a reguletoarelor ținând seama de restricții operaționale. A fost propusă o tehnică nouă de acordare a reguletoarelor de complexitate redusă folosite în bucle de reglare pentru procese neliniare și ținând seama de restricțiile operaționale. Sunt prezentate detalii în capitolul F și acestea sunt însoțite de bibliografia prezentată în capitolul G.
 - 1.2. Extinderea tehnicilor de acordare optimală pentru sisteme neliniare. Tehnicile au fost extinse prin utilizarea rețelelor neuronale. Sunt prezentate detalii în capitolul F pentru una din tehnici. Detaliile sunt însoțite de bibliografia prezentată în capitolul G.

- 1.3. Implementarea și validarea tehnicilor propuse pe echipamentele de laborator. Noile tehnici au fost validate prin simulări și experimente efectuate pe două procese neliniare, un sistem cu trei rezervoare verticale și un sistem aerodinamic cu două rotoare din laboratorul în care își desfășoară activitatea echipa de cercetare.
- (2) Exploatarea și diseminarea rezultatelor. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv, cu rezultatele prezentate în capitolul G, se referă la:
- 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În 2012 au fost publicate 6 lucrări, [D1], [P1] - [P4], [R1], în reviste cotate ISI cu factor de impact între 3.643 și 0.588, cu scor relativ de influență între 1.27628865979381 și 0.
- 2.2. Participarea și publicarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. În 2013 au fost publicate 1 lucrare, [P5], în revistă indexată în baze de date internaționale (Zentrallblatt MATH), 8 lucrări, [P6], [R2], [R3], [S1] - [S5], în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore), 2 capitole de carte, [P7], [S6], în editura Springer-Verlag.

Principalele rezultate obținute în perioada **2011-2013** sunt:

- 16 lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact, factor de impact cumulat ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2012 Journal Citation Reports = 28.472, scor relativ de influență cumulat = 13.9733210061.
- 6 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate ISI (ISI Proceedings).
- 1 lucrare publicată în revistă indexată în baze de date internaționale (Zentrallblatt MATH).
- 19 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, DBLP, Scopus).
- 5 capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag.
- 1 lucrare, http://www.aut.upt.ro/~rprecup/Web_page_Best_paper_award_WSC16.pdf, premiată cu *Best Paper Award* la 16th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC16 (Loughborough University, UK, 2011).

În continuare sunt prezentate rezultatele defalcate pe cei trei ani, 2011, 2012 și 2013.

Rezultate obținute în 2011:

- 1 lucrare publicată în revistă ISI cu factor de impact, factor de impact ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2012 Journal Citation Reports = 3.766, scor relativ de influență = 2.33890214797136.
- 1 lucrare publicată în volumul unei conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore).
- 1 lucrare, http://www.aut.upt.ro/~rprecup/Web_page_Best_paper_award_WSC16.pdf [P1], premiată cu **Best Paper Award** la 16th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC16 (Loughborough University, UK, 2011).

Rezultate obținute în 2012:

- 9 lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact, factor de impact cumulat ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2012 Journal Citation Reports = 14.262, scor relativ de influență cumulat = 6.69087016575.
- 6 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate ISI (ISI Proceedings).
- 10 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, DBLP, Scopus).
- 3 capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag.

Rezultate obținute în 2013:

- 6 lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact, factor de impact cumulat ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2012 Journal Citation Reports = 10.444, scor relativ de influență cumulat = 4.94354869246.
- 1 lucrare publicată în revistă indexată în baze de date internaționale (Zentrallblatt MATH).
- 8 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, Scopus).
- 2 capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag.

B. ANALIZA STADIULUI ACTUAL PRIVIND CERCETĂRILE TEORETICE ȘI APLICAȚIILE PRACTICE ALE IFT

Cele două direcții de cercetare predominante care au la bază tehnica IFT sunt: dezvoltările teoretice ale tehnicii și validarea experimentală pe procese industriale reale. Aceste direcții au mers în paralel încă de la începutul IFT în 1994.

Pe prima direcție, dacă primii opt ani de preocupări legate de IFT au fost dedicați adaptării IFT pentru o gamă largă de aplicații, perioada 2002-prezent este dedicată îmbunătățirii aspectelor particulare ale tehnicii, combinării cu alte structuri de reglare automată, plasării IFT în contextul mai general al tehnicilor bazate pe experimente pentru a oferi o viziune unificată a acestora. Aceste necesități de abordare au emanat din conștientizarea faptului că efectuarea unei acordări experimentale nu este suficientă ci este adiacentă ca și scop asigurării performanțelor prin

prisma asigurării stabilității SRA, a performanțelor robuste, etc. Aceste deziderate nu pot fi îndeplinite fără o anumită cantitate de informație din interiorul buclei de reglare deci automat cunoașterea unor aspecte legate de procesul condus. S-a încercat astfel evitarea unei identificări directe a procesului condus și extragerea informațiilor semnificative prin alte abordări. În sensul definit anterior, în cele ce urmează sunt analizate sintetic câteva lucrări marcante pentru această direcție.

În [D4] se încearcă analiza convergenței algoritmului de căutare specific IFT și lărgirea domeniului de atracție prin procedura de „cost function shaping”. Această procedură are ca și grade de libertate în proiectare modelul de referință și intrarea de prescriere a SRA. Fără un model aproximativ al funcției de sensibilitate a buclei închise nu se poate asigura unicitatea minimului global în cadrul domeniului de atracție al algoritmului de căutare.

În [D5] stabilitatea de-a lungul iterațiilor IFT este asigurată prin asigurarea condiției suficiente ca distanța Vinnicombe („mu-gap metric”) dintre regulatorul curent și cel viitor să fie mai mică decât rezerva de stabilitate generalizată. Calculul acestor indicatori se face folosind modele neparametrice în domeniul frecvență pentru bucla închisă (deci neidentificând direct procesul condus) obținute prin analiză spectrală de corelație a semnalelor în timp discret.

În [D6] este prezentată o metodă experimentală de a estima norma infinită a unor sisteme, abordare care poate fi folosită la asigurarea stabilității SRA în timpul acordărilor iterative prin tratarea într-un cadru de analiză de stabilitate robustă.

Lucrările [D7] și [D8] sunt dedicate îmbunătățirii convergenței algoritmului de căutare al IFT folosind semnalul de referință ca și grad de libertate în proiectarea unor SRA destinate rejecției perturbațiilor.

Lucrarea [D9] este de asemenea dedicată validării stabilității SRA folosind două tipuri de teste pe bucla închisă, din care se extrag datele necesare: un test folosind răspunsul la semnal treaptă al SRA și un test folosind un criteriu similar cu criteriul Nyquist în domeniul frecvență.

În [D10] este folosit un cadru de analiză de stabilitate robustă pentru tehnici neiterative (sau într-o iterație, în genul VRFT). Sunt găsite condiții suficiente pentru asigurarea stabilității SRA folosind o versiune a teoremei amplificărilor mici, folosind de asemenea o estimare a normei infinite a unui sistem din date experimentale.

Pe direcția de cercetare care vizează aplicarea IFT, sunt amintite câteva dintre lucrările semnificative din ultimii cinci ani. IFT a fost aplicată la servosisteme (hard-disk [D11], mașini unelte [D12], control de poziție/viteză la motoare [D13], industria semiconductorilor pentru fabricarea integratelor [D17]), chimie (coloane de distilare [D16],[D19], actuatori de tip „Ionic Polymer Metal Composite” (IPMC) [D15],[D20]), controlul raportului aer/combustibil la motoarele cu ardere internă [D18].

C. SOLUȚIE NOUĂ DE GARANTARE A STABILITĂȚII SRA DE-A LUNGUL ITERAȚIILOR IFT

În perioada octombrie-decembrie 2011 a fost efectuată analiza stabilității SRA de-a lungul iterațiilor IFT. Este propusă o soluție nouă și simplă, problema fiind pusă într-un context specific analizei de robustețe. Astfel, regulatorul cu un grad de libertate supus acordării este reprezentat ca un element cu incertitudine și în acest scop este aplicată o variantă a teoremei amplificărilor mici pentru sistemele în timp discret. Sunt estimate margini superioare pentru amplificarea sistemelor implicate în analiza de stabilitate folosind modele neparametrice de tipul funcțiilor de răspuns în frecvență (FRF), motivația fiind faptul că acestea sunt mai ușor de obținut decât modelele parametrice. Nu este utilizat un model de tip FRF al procesului condus deoarece pe de-o parte este dificilă analiza efectelor de răspândire a incertitudinilor modelului FRF, iar pe de altă parte modelele de tip FRF pentru SRA sunt în general mai simple, având caracter de tip filtru trece jos pentru marea majoritate a SRA.

Procesul condus este modelat matematic sub form SISO LTI

$$y(k) = P(z)u(k) + v(k), \quad (1)$$

în care u este intrarea (comanda), y este ieșirea reglată și v este zgomotul de măsură. Algoritmul de reglare cu timp discret este exprimat sub următoarea formă care pune în evidență funcția de transfer (f.d.t.) a regulatorului numeric $C(z)$:

$$u(k) = C(z)(r(k) - y(k)), \quad (2)$$

în care r este referința. Legea de actualizare a parametrilor din cadrul IFT are expresia

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \Delta_k, \quad \Delta_k = -\gamma_k \hat{d}\mathbf{J}(\mathbf{p}_k), \quad (3)$$

în care: \mathbf{p}_k și \mathbf{p}_{k+1} – vectorul parametrilor la iterația curentă și respectiv următoare, $\hat{d}\mathbf{J}$ – estimatul gradientului funcției obiectiv (f.o.) $J(\mathbf{p})$ în raport cu \mathbf{p} , γ_k – coeficientul de scalare a pasului, Δ_k – termen de corecție care include atât estimatul gradientului cât și coeficientul de scalare a pasului.

F.o. este definită de regulă sub formă generală de criteriu de tip LQG:

$$J(\mathbf{p}) = 1/(2N)E\left\{\sum_{k=1}^N [(y(k, \mathbf{p}) - y^d(k))^2 + \lambda u^2(k, \mathbf{p})]\right\}, \quad (4)$$

în care $y^d(k)$ este traiectoria dorită a modelului de referință, λ ponderează comanda și operatorul speranță matematică $E\{\}$ este calculat în raport cu perturbațiile stohastice aplicate conform relației (1).

În cele ce urmează este propusă o soluție de IFT stabilă dezvoltată în cadrul teoretic al stabilității robuste în care acordarea parametrilor reglatoarelor este privită ca o incertitudine de tip factor coprim conform definiției din

[D1]. Soluția este concentrată asupra calculului coeficientului de scalare din relația (3). Se presupune că există un regulator inițial stabilizator reprezentat sub formă de filtru rațional prin f.d.t.

$$C(z) = B(z) / A(z) = \left[\sum_{i=1}^m b_i z^{-i} \right] / \left[\sum_{i=0}^n a_i z^{-i} \right]. \quad (5)$$

Regulatorul este parametrizat prin vectorul $\mathbf{p} = [b_1 \dots b_m a_0 \dots a_n]^T$, care este inclus în schema de acordare pe bază de IFT prezentată în relația (3). Termenul de corecție Δ_k definit în (3) poate fi descompus în următoarele două componente reprezentând corecții pentru numărătorul respectiv numitorul f.d.t. a regulatorului:

$$\Delta_k = [\delta_B \ \delta_A]^T, \quad (6)$$

care sunt private ca incertitudini. Ca efect dorit al aplicării algoritmului IFT se obține următoarea legătură între regulatorul de la iterația curentă (cu indicele k) și cel de la iterația următoare (cu indicele $k+1$):

$$C_{k+1}(z) = \frac{\sum_{i=1}^m b_i z^{-i} + \sum_{i=1}^m \delta_{B_i} z^{-i}}{\sum_{i=0}^n a_i z^{-i} + \sum_{i=0}^n \delta_{A_i} z^{-i}} = \frac{B(z) + B_\Delta(z)}{A(z) + A_\Delta(z)} = \frac{C_k(z) + \Delta_B(z)}{1 + \Delta_A(z)}, \quad C_k(z) = B(z) / A(z), \quad (7)$$

$$\Delta_B(z) = B_\Delta(z) / A(z), \quad \Delta_A(z) = A_\Delta(z) / A(z).$$

Toate f.d.t. din ultima formă prezentată în (7) sunt stabile. Introducerea regulatorului următor în SRA împreună cu perturbațiile aplicate numărătorului și numitorului pot fi manipulate conform Fig. 1 (a) prin algebra schemelor bloc. Apoi polinoamele de incertitudine pot fi grupate sub forma matricei de transfer (matrice linie)

$$\Delta_{AB}(z) = [-\Delta_A(z) \ \Delta_B(z)] \quad (8)$$

conform Fig. 1 (b).

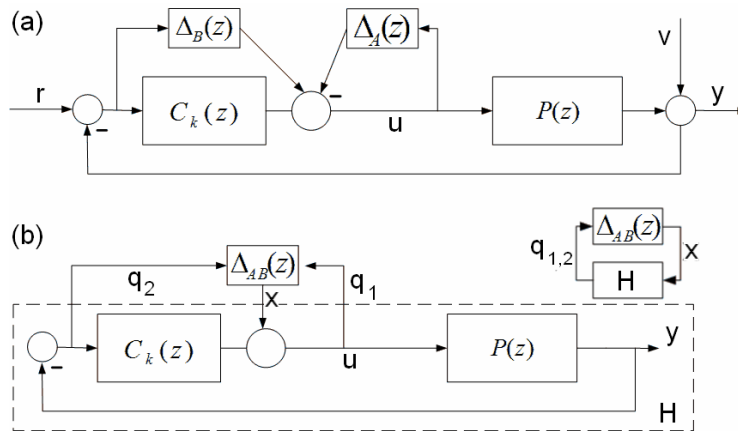


Fig. 1. Regulatorul următor construit ca incertitudine pentru cel curent (a) și transformarea sub formă standard LFT superioară (b).

Condiția suficientă de stabilitate a SRA care rezultă în urma dezvoltărilor succesive este:

$$\|\Delta_{AB}(z)\|_\infty < 1/\alpha, \quad (9)$$

soluția de IFT stabilă putând fi considerată și ca metodă pentru că este organizată sub forma pașilor 1), 2) și 3):

- 1) Se proiectează și se acordează un regulator inițial care asigură un SRA stabil.
- 2) La fiecare iterație se execută următoarele:

- Experimentul normal.
- Experimentele următoare necesare estimării gradientului f.o. și eventual hessianului f.o.
- Un experiment suplimentar pentru estimarea lui α . Se obține $\gamma_k > 0$ care satisface (9) și se calculează următorul vector al parametrilor utilizând relația (3). Întrucât regulatorul curent stabilizează SRA, se garantează că și regulatorul următor va face acest lucru datorită aplicării teoremei amplificărilor mici.

3) Se testează condiția de terminare a procesului iterativ de calcul aferent algoritmului IFT care este exprimată prin îmbunătățiri minore ale valorii f.o. sau/și prin calculul hessianului f.o. în apropierea punctului deminimum. Dacă această condiție este îndeplinită atunci algoritmul este terminat; în caz contrar se face un salt la pasul 2).

Concluzionând, modelele de tip FRF pot fi obținute fie din analiza Fourier a semnalelor rezultând un estimator empiric al FRF, fie din analiză spectrală și de corelație. Rezultatele prezentate în cadrul acestui capitol sunt validate prin simulări numerice pe un studiu de caz prezentat în [D3]. Ideea de bază propusă de colectivul de cercetare este deosebit de avantajoasă deoarece poate fi generalizată fără mari dificultăți la orice schemă iterativă de acordare cum sunt Iterative Regression Tuning (IRT), Correlation-based Tuning (CbT), Frequency-domain Tuning (FdT) și Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA).

D. ANALIZA STADIULUI ACTUAL PRIVIND CERCETĂRILE TEORETICE ȘI APLICAȚIILE PRACTICE ALE TEHNICILOR EXPERIMENTALE (DATA-BASED CONTROL)

Tehnicile iterative de acordare automată a reguletoarelor prin optimizare bazată pe experimente ajută la îmbunătățirea performanțelor sistemelor de reglare automată (SRA) folosind informație minimă despre procesul condus [1]–[6]. Această îmbunătățire a performanțelor SRA prin tehnici iterative este realizată prin intermediul indicatorilor de performanță care sunt simpli de interpretat de către utilizatorii neexperimentați. Indicatorii sunt specificați de regulă în domeniul timp (spre exemplu, timp de creștere, suprareglaj) și sunt încorporați în funcții obiectiv (funcții de cost sau criteriu) de tip integral sau sumă cum ar fi, de exemplu, criteriul liniar pătratic Gaussian (LQG). Minimizarea acestor funcții obiectiv (FO) formulate în general ca și probleme de optimizare cu restricții ajută la îndeplinirea anumitor obiective cum ar fi urmărirea traiectoriei de referință (sau corespunzător, în regim dynamic, urmărirea unui model de referință), penalizarea efortului comenzii, atenuarea perturbațiilor, etc.

Tehnicile principale care asigură acordarea iterativă a parametrilor reguletoarelor automate sunt Iterative Feedback Tuning (IFT), [7], Correlation-based Tuning (CbT) [8], Frequency Domain Tuning [9], Iterative Regression Tuning [10], Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation [11], [12], Pulse Response based Ccontrol [13], Markov data-based LQG Control [14], data-driven sau data-based predictive control [15]–[17], LQ data-driven control [18] și cea mai populară tehnică neiterativă, Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) [19]. Aceste tehnici oferă abordări diferite în a asigura îmbunătățirea performanțelor SRA într-un cadru independent de modelul procesului condus (PC). Pe de altă parte, evitarea folosirii modelului PC nu asigură performanțe robuste, limitând analiza. Diverse abordări recente adresează tocmai această problemă încercând în același timp să folosească cât mai puțină informație despre PC. Aceste abordări evită identificarea directă a PC și folosesc informație indirectă despre PC din modele nonparametrice ale sistemului închis corespunzător SRA. Modelele obținute, cum ar fi funcțiile de răspuns în frecvență sunt relativ ușor de obținut. Chiar și în abordarea identificării parametrice, modele de ordin redus de calitate acceptabilă pot fi folosite datorită comportamentului tipic al SRA (uzual de tip filtru trece jos) [9], [20].

Urmărirea traiectoriei de referință (RTT) reprezintă o problemă foarte des întâlnită și poate fi tratată ca o problemă de optimizare a semnalului de la intrarea de prescriere (referință) a SRA. SRA se consideră a priori acordat pentru asigurarea stabilității, respectiv a comportării în mod favorabil în raport cu perturbațiile. Astfel, problema RTT poate fi tratată ca o problemă de conducere optimală în buclă deschisă. Abordarea uzuală specifică tehnicii IFT constă în aplicarea unei căutări bazate pe informație de gradient, informație care este obținută pur experimental și fără a face uz de modelul PC. Prin similitudine, optimizarea traiectoriei de referință în mod recursive înlocuiește procedura de modificare recurentă a parametrilor regulatorului și face uz de cadrul de analiză specific tehnicilor de tip Iterative Learning Control (ILC) [21], [22]. Tratări existente ale soluțiilor de tip ILC în problemele de conducere optimală sunt raportate în [23], [24], cu studii privind analiza de convergență în [25], abordarea în cadru stochastic în [26] și problema RTT în [27].

În raport cu stadiul actual al cercetărilor din domeniu, este propusă o nouă abordare pentru un algoritm pur experimental pentru asigurarea urmării traiectoriei de referință pentru un SRA. Algoritmul rezolvă iterativ problema de conducere optimală într-un cadru experimental, ținând seama de restricții și de factorii aleatori care afectează rezultatele. Este folosit un algoritm de tip Interior Point Barrier (IPB) prin care restricțiile de tip inegalitate definite în raport cu limitarea comenzii din interiorul SRA sunt exprimate și înglobate în așa numita funcție de penalizare de tip barieră prin care problema de optimizare cu restricții este devine problemă de optimizare fără restricții. Avantajele în raport cu soluțiile existente sunt:

- Algoritmul funcționează pe baza experimentelor efectuate asupra SRA real; astfel, el poate compensa incertitudinile de modelare și neliniaritățile PC.
- Algoritmul folosește un număr relativ redus de experimente, soluție atractivă din punct de vedere al costurilor de implementare.

E. TEHNICĂ NOUĂ DE OPTIMIZARE A REFERINȚEI SRA UTILIZÂND EXPERIMENTE BAZATE PE IFT ȘI ILC

În perioada ianuarie 2012-decembrie 2012 au fost studiate diverse probleme legate atât de îmbunătățirea tehnicilor iterative cât și de combinarea acestor tehnici cu reguletoare de tip fuzzy. Astfel au fost studiate: implementarea CbT pe echipament de laborator [C1] și asigurarea stabilității de-a lungul iterațiilor CbT [R1], problema urmării traiectoriei de referință într-un cadru bazat pe experimente [R2], aplicarea IFT pe echipament de laborator [R3], asigurarea stabilității și convergenței tehnicii IFT folosită pentru acordarea reguletoarelor fuzzy [P1] și altele cu rezultate diseminate conform capitoului G.

Fie SRA descris prin modelul monovariabil liniar invariant în timp:

$$y(\mathbf{p}, r, k) = T(\mathbf{p}, q^{-1})r(k) + S(\mathbf{p}, q^{-1})v(k), \quad (1)$$

în care k este argumentul de timp discret, $y(k)$ reprezintă ieșirea controlată a SRA, $r(k)$ este intrarea de referință, $v(k)$ este perturbația aleatoare de medie nulă, staționară și mărginită care afectează ieșirea PC și descrie perturbații generale de tip sarcină și/sau erori de măsurare, iar $S(\mathbf{p}, q^{-1})$ și $T(\mathbf{p}, q^{-1})$ reprezentate prin:

$$S(\mathbf{p}, q^{-1}) = 1/[1 + P(q^{-1})C(\mathbf{p}, q^{-1})], T(\mathbf{p}, q^{-1}) = 1 - S(\mathbf{p}, q^{-1}), \quad (2)$$

reprezintă funcția de sensibilitate și respectiv funcția complementară de sensibilitate, $P(q^{-1})$ este funcția de transfer (f.d.t.) a PC, $C(\mathbf{p}, q^{-1})$ este f.d.t. a regulatorului în reacție care este parametrizat în vectorul parametrilor \mathbf{p} , și q^{-1} este operatorul de întârziere în timp cu un pas. Vectorul \mathbf{p} va fi omis pe alocuri pentru simplitatea descrierii.

Traectoria de referință $y^d(k)$ poate fi generată, de exemplu, prin intermediul unui model de referință. Comanda $u(k)$ nu apare explicit în (1) și poate reprezenta interes în problema de conducere, ea fiind accesibilă măsurărilor. Obiectivul RTT este minimizarea FO J exprimată ca speranța matematică aplicată normei euclidiene a vectorului eroare de urmărire a traectoriei de referință, pe un orizont de timp finit N :

$$J(\mathbf{p}, r) = E\{\|e^l\|_2^2} = (1/N) \sum_{k=0}^N [y(\mathbf{p}, r, k) - y^d(k)]^2, \quad (3)$$

în care $e^l(\mathbf{p}, k) = y(\mathbf{p}, r, k) - y^d(k)$ reprezintă eroarea de urmărire iar pentru ea se pot defini diverse restricții care pot fi mai apoi incluse în problema de optimizare.

Din (1), rezultă că minimizarea expresiei (3) se poate realiza modificând oricare din variabilele \mathbf{p} sau r , fapt care se traduce în modificarea parametrilor regulatorului respectiv în modificarea referinței r . Modificarea oricărei variabile duce la un efect echivalent în modificarea mărimii $y(k)$ datorită dezvoltării în serie Taylor în care termenii care conțin derivatele de ordin mai mare decât unu sunt neglijați. Dezvoltarea se face în jurul valorilor nominale ale lui \mathbf{p} și r , notate \mathbf{p}_n și respectiv r_n :

$$y(\mathbf{p}, r) = y(\mathbf{p}_n, r_n) + (\partial y / \partial \mathbf{p} |_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_n})(\mathbf{p} - \mathbf{p}_n) + \text{h.o.t.} \approx y(\mathbf{p}, r_n) + (\partial y / \partial r |_{r=r_n})(r - r_n) + \text{h.o.t.} \quad (4)$$

Acordarea simultană a variabilelor \mathbf{p} și r , poate fi interpretată ca o schemă de acordare pentru o structură cu două grade de libertate (2-DOF), unde regulatorul în reacție este acordat pentru a asigura o comportare favorabilă în raport cu perturbațiile iar filtrul de pe intrarea de referință $F(\mathbf{p})$ este acordat pentru RTT. Ideea este ilustrată în Fig. 1, cu σ – intrarea de referință de tip treaptă și e – eroarea de reglare.

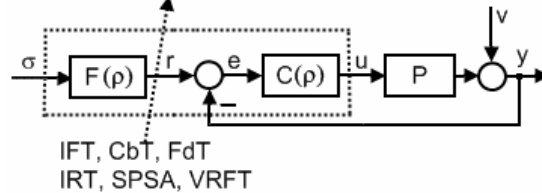


Fig. 1. Sistem de reglare automată interpretat ca structură 2-DOF.

Problematika RTT poate fi formulată ca și o problemă de conducere optimală în care variabilele de optimizare sunt reprezentate de eșantioanele semnalului de referință:

$$r^* = \arg \min_r J(\mathbf{p}, r) \text{ supusa la dinamica sistemului (1) si la restrictiile de functionare.} \quad (5)$$

Pentru a rezolva analitic problema (5), este esențială cunoașterea PC. Chiar și așa, discrepanțele dintre model și realitate pot afecta performanțele dorite. În cadrul proiectului se consideră că abordarea specifică tehnicii IFT, folosind o căutare bazată pe gradient, poate fi o soluție acceptabilă, prin care informația de gradient este obținută experimental, evitând cunoașterea PC. Algoritmul recurent de calcul al referinței poate fi formulat sub forma:

$$r_{j+1} = r_j - \gamma_j \text{est}\{dJ / dr |_{r_j}\}, \quad (6)$$

în care indicele inferior j indică numărul iterației, estimatorul gradientului $\text{est}\{dJ / dr |_{r_j}\}$ este obținut pur experimental și γ_j este un coeficient de scalare al pasului. Această abordare determină ca algoritmul (6) să poată fi analizat convenabil și relativ ușor folosind cadrul specific tehnicilor ILC [10]–[12]. Pentru un sistemul închis de grad relativ n caracterizat de f.d.t. $T(q^{-1})$, reprezentarea în formă vectorială pentru un experiment pe durata a N eșantioane, în cazul determinist, este:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{T}\mathbf{R} + \mathbf{Y}_0, \mathbf{Y} = [y(n) \quad y(n+1) \quad \dots \quad y(N-1)]^T, \mathbf{R} = [r(0) \quad r(1) \quad \dots \quad r(N-n-1)]^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{Y}_0 = [y_{10} \quad y_{20} \quad \dots \quad y_{(N-n)0}]^T, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & \dots & 0 \\ t_2 & t_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{N-n} & t_{N-n-1} & \dots & t_1 \end{bmatrix},$$

\mathbf{R} este vectorul eșantioanelor semnalului de referință pe intervalul de timp $0 \leq k \leq N-n-1$, \mathbf{Y} este vectorul eșantioanelor ieșirii controlate, t_i este al i -lea parametru Markov (coeficient al răspunsului la impuls) al f.d.t. $T(q^{-1})$, \mathbf{T} este o matrice Toeplitz inferior triunghiulară formată din coeficienții răspunsului la impuls, \mathbf{Y}_0 conține eșantioanele răspunsului liber al sistemului închis datorat condițiilor inițiale nenule, iar indicele superior T indică operația de transpunere a unei matrici. Fără a restrânge generalitatea problemei, putem considera condiții inițiale nule. Astfel vectorul eșantioanelor erorii de urmărire a traectoriei de referință poate fi exprimat sub forma:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Y} - \mathbf{Y}^d = \mathbf{T}\mathbf{R} - \mathbf{Y}^d, \quad (8)$$

în care \mathbf{Y}^d este vectorul eșantioanelor traectoriei de referință. Cunoașterea aplicației \mathbf{T} conduce imediat la soluția problemei de optimizare care asigură eroare de urmărire nulă, soluția calculându-se $\mathbf{R} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{Y}^d$. Totuși, matricea \mathbf{T}

poate fi slab condiționată și dacă este supusă determinării experimentale prin măsurare ea este afectată de erorile de măsurare, așadar inversa sa, \mathbf{T}^{-1} , nu poate fi folosită.

Combinăția relațiilor (5) și (6) care tratează problematica ILC într-un cadru de conducere optimală este tratată și în [12]–[16]; în cele ce urmează este schițată noua abordare a echipei de cercetare. FO este pătratică în raport cu vectorul \mathbf{R} iar gradientul FO în cazul determinist la fiecare iterație j poate fi exprimată sub forma:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \mathbf{R}} \right|_{\mathbf{R}=\mathbf{R}_j} = 2\mathbf{T}^T \mathbf{E}_j. \quad (9)$$

Relația (9) sugerează că informația de gradient poate fi obținută folosind matricea \mathbf{T} obținută experimental sau, folosind un experiment special numit "de gradient" la fiecare iterație a algoritmului de căutare. Alegerea uneia dintre cele două variante prezentate depinde de proprietățile zgomotului de măsură care afectează calitatea lui \mathbf{T} , respectiv de posibilitatea de a conduce experimente pe SRA. Aceste experimente de gradient pot afecta regimurile nominale de funcționare. Pentru a obține informația de gradient $\mathbf{T}^T \mathbf{E}_j$, se execută următorii pași:

Pasul 1. Se înregistrează în \mathbf{E}_j eroarea de urmărire a traiectoriei de referință la iterația curentă j .

Pasul 2. Se definește vectorul inversat $rev(\mathbf{E}_j)$:

$$rev(\mathbf{E}_j) = rev([e'_j(0) \ \dots \ e'_j(N-n-1)]^T) = [e'_j(N-n-1) \ \dots \ e'_j(0)]^T. \quad (10)$$

Pasul 3. $rev(\mathbf{E}_j)$ este aplicat la intrarea de referință a SRA în condiții inițiale nule și se obține la ieșirea SRA vectorul $\mathbf{Y} = \mathbf{T} rev(\mathbf{E}_j)$.

Pasul 4. Se obține $\mathbf{T}^T \mathbf{E}_j$ inversând vectorul $\mathbf{T} rev(\mathbf{E}_j)$.

Acest experiment relativ simplu furnizează informația de gradient fără a folosi modelul PC.

În majoritatea aplicațiilor industriale, restricțiile operaționale cum ar fi limitările elementelor de execuție sau limitările mărimilor conduse sunt de importanță crucială. Există diverse soluții de rezolvare a problemei de optimizare (5) în acest caz. Totuși, în rezolvarea experimentală a problemei (5) trebuie găsită o soluție care să necesite un număr redus de iterații dar și un număr redus de experimente informative care ar putea afecta regimurile nominale de funcționare a SRA.

Reprezentarea sub formă vectorială permite expresia unei forme particulare a problemei de optimizare. În cazul pur determinist, fie $\mathbf{S}_{ur} \in R^{(N-m) \times (N-m)}$ reprezentarea matriceală a f.d.t. $S_{ur}(q^{-1}) = C(q^{-1})S(q^{-1})$. Pentru un sistem $S_{ur}(q^{-1})$ de grad relativ m , este valabilă condiția $m \leq n$. Vectorul eșantioanelor comenzii exprimat prin relația $\mathbf{U} = \mathbf{S}_{ur} \mathbf{R}$, unde $\mathbf{R} \in R^{(N-m) \times 1}$ este un vector de dimensiune mai mare decât cel corespunzător în (7), unde $\mathbf{R} \in R^{(N-n) \times 1}$. Se consideră mai departe o trunchiere a matricii \mathbf{S}_{ur} , care corespunde minorului de nord-vest de dimensiune $N-n$ astfel încât doar trunchierea $\mathbf{S}_{ur} \in R^{(N-n) \times (N-n)}$ este folosită în continuare. Astfel, doar $N-n$ restricții (din $N-m$) pentru \mathbf{U} pot fi impuse, care se traduce prin restricțiile de tip inegalitate $\mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{U}(\mathbf{R}) \leq \mathbf{U}_{\max}$ și care sunt funcții afine de \mathbf{R} . FO $J(\mathbf{R})$ este pătratică în raport cu \mathbf{R} :

$$J(\mathbf{R}) = E\{(1/N)(\mathbf{T}\mathbf{R} - \underbrace{\mathbf{Y}^d}_{\mathbf{M}})^T (\mathbf{T}\mathbf{R} - \mathbf{Y}^d)\} = E\{(1/N)(\mathbf{R}^T \mathbf{Q} \mathbf{R} + \mathbf{q} \mathbf{R} + \alpha)\}, \quad (11)$$

cu $\mathbf{Q} = \mathbf{T}^T \mathbf{T}$ – pozitiv semi-definită, $\mathbf{q} = 2 \mathbf{M} \mathbf{T}^T$ și $\alpha = \mathbf{M}^T \mathbf{M}$. Problema de optimizare care rezolvă problema RTT poate fi deci rescrisă sub forma:

$$\mathbf{R}^* = \arg \min_{\mathbf{R}} (\mathbf{R}^T \mathbf{Q} \mathbf{R} + \mathbf{q} \mathbf{R} + \alpha), \text{ supusa la } \tilde{\mathbf{S}} \mathbf{R} \leq \tilde{\mathbf{U}}, \quad \tilde{\mathbf{S}} = [\mathbf{S}_{ur}^T \quad -\mathbf{S}_{ur}^T]^T \in R^{2(N-n) \times (N-n)}, \quad (12)$$

$$\tilde{\mathbf{U}} = [\mathbf{U}_{\max}^T \quad -\mathbf{U}_{\min}^T]^T \in R^{2(N-n) \times 1}.$$

Există o gamă variată de algoritmi numerici pentru rezolvarea problemelor în care FO este convexă și patrică în argument și care pot fi folosiți pentru a rezolva problema (12). Un astfel de algoritm numeric este IPB. Algoritmul IPB va fi adaptat problemei RTT astfel încât să se preteze unei abordări pur experimentale în rezolvarea problemei RTT (12). Ideea de bază este transformarea (12) într-o problemă de optimizare fără restricții:

$$\mathbf{R}^* = \arg \min_{\mathbf{R}} (\mathbf{R}^T \mathbf{Q} \mathbf{R} + \mathbf{q} \mathbf{R} + c + \kappa \phi(\mathbf{R})), \quad (13)$$

cu $\kappa > 0$, iar $\phi(\mathbf{R})$ este funcția barieră:

$$\phi(\mathbf{R}) = -\sum_{i=1}^c \log(\tilde{u}_i - \tilde{\mathbf{s}}_i^T \mathbf{R}), \quad (14)$$

în care \tilde{u}_i este elementul i al $\tilde{\mathbf{U}}$, $\tilde{\mathbf{s}}_i^T$ este rândul i din $\tilde{\mathbf{S}}$, și $c = 2(N-n)$ este numărul de restricții de tip inegalitate. Încălcarea restricțiilor face ca noua FO să tindă la infinit.

Noua FO poate fi evaluată într-un singur experiment pentru intrarea de referință de la iterația curentă deoarece comanda poate fi înregistrată. Pentru (13) o căutare bazată pe gradient poate fi apoi folosită, fapt ce presupune estimarea gradientului FO în raport cu vectorul \mathbf{R} . Această informație poate fi obținută ca și în algoritmul descris anterior pentru primii trei termeni din FO (13). Însă și gradientul funcției barieră în raport cu \mathbf{R} poate fi estimat experimental după cum urmează.

Pentru un experiment de durată N , $\mathbf{R} \in R^{(N-n) \times 1}$, $2(N-n)$ restricții de tip inegalitate pot fi definite pentru comandă, prin limitarea superioară și inferioară a acesteia. Doar pentru $N-n$ restricții de tip inegalitate care corespund limitării superioare a comenzii se poate arăta că gradientul lui $\phi(\mathbf{R})$ în raport cu \mathbf{R} este:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{R}} = \mathbf{S}_{ur}^T \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (15)$$

în care $\boldsymbol{\varepsilon} = \left[\frac{1}{\tilde{u}_1 - \tilde{\mathbf{s}}_1^T \mathbf{R}} \quad \dots \quad \frac{1}{\tilde{u}_{N-n} - \tilde{\mathbf{s}}_{N-n}^T \mathbf{R}} \right]^T$ poate fi evaluat experimental cu referința la iterația curentă. Dar acest gradient poate fi obținut folosind exact aceeași schemă de gradient prezentă anterior, într-un experiment special. Profitând de dimensiunea aplicației \mathbf{S}_{ur} , pentru a obține pe rând gradientul pentru câte $N-n$ restricții, funcția barieră este împărțită în două. Rezultă gradientul FO din (13) exprimat sub forma:

$$\left. \frac{\partial \tilde{J}}{\partial \mathbf{R}} \right|_{\mathbf{R}=\mathbf{R}_j} = 2\mathbf{T}^T \mathbf{E}_j + \kappa (\mathbf{S}_{ur}^T \boldsymbol{\varepsilon}_G^1(\mathbf{R}_j) + \mathbf{S}_{ur}^T \boldsymbol{\varepsilon}_G^2(\mathbf{R}_j)), \quad (16)$$

în care $\boldsymbol{\varepsilon}_G^1(\mathbf{R}_j)$ și $\boldsymbol{\varepsilon}_G^2(\mathbf{R}_j)$ sunt definiți similar cu $\boldsymbol{\varepsilon}$ din (15), $\boldsymbol{\varepsilon}_G^1(\mathbf{R}_j)$ definește primele $N-n$ restricții, $\boldsymbol{\varepsilon}_G^2(\mathbf{R}_j)$ definește restul de $N-n$ restricții, și indicele inferior G denotă "gradient". Gradientul se obține astfel prin trei experimente speciale, după cum urmează.

Pentru accelerarea convergenței spre minimul FO poate fi folosită și o aproximare Gauss-Newton a hessianului FO:

$$H(\mathbf{R}_j) = \left. \frac{\partial^2 \tilde{J}}{\partial \mathbf{R}^2} \right|_{\mathbf{R}=\mathbf{R}_j} = 2\mathbf{T}^T \mathbf{T} + \kappa \mathbf{S}_{ur}^T \mathbf{S}_{ur} (\boldsymbol{\varepsilon}_H^1(\mathbf{R}_j) + \boldsymbol{\varepsilon}_H^2(\mathbf{R}_j)), \quad (17)$$

în care $\boldsymbol{\varepsilon}_H^i = \left[\frac{1}{(\tilde{u}_i - \tilde{\mathbf{s}}_i^T \mathbf{R})^2} \quad \dots \quad \frac{1}{(\tilde{u}_{N-n} - \tilde{\mathbf{s}}_{N-n}^T \mathbf{R})^2} \right]^T$, $i \in \{1, 2\}$, pentru fiecare mulțime de câte $N-n$ restricții. \mathbf{T} și \mathbf{S}_{ur} pot fi obținuți experimental, și fiecare $\boldsymbol{\varepsilon}_H^i(\mathbf{R}_j)$ poate fi evaluat după un experiment normal cu referința curentă. Indicele inferior H pune în evidență în acest caz hessian-ul.

Algoritmul experimental pentru rezolvarea problemei RTT folosind algoritmul IPB combinat cu o căutare de tip Newton constă în pașii B1 și B2 prezentați mai jos:

Pasul B1. Se alege $\kappa^0 > 0, \mu > 1$ și o referință inițială \mathbf{R}^0 care nu încalcă restricțiile. Se impun restricțiile de tip inegalitate pentru comandă și se generează traiectoria de referință. Indicii pentru iterația externă indexată de κ se inițializează cu valoarea $j_\kappa = 0$ și pentru referința \mathbf{R} indexul se inițializează cu $j_R = 0$. Pentru aplicațiile \mathbf{T} și \mathbf{S}_{ur} estimate experimental se parcurg pașii de la N1 la N7.

Pasul N1. Se alege γ_0 și se inițializează indexul iterației interne cu $i = 0$. La fiecare iterație a algoritmului de căutare se repetă pașii următori:

Pasul N2. Se execută un experiment normal cu referința curentă \mathbf{R}^{j_R} . Se evaluează FO în (13) precum și variabilele vectoriale $\boldsymbol{\varepsilon}_G^1, \boldsymbol{\varepsilon}_G^2, \boldsymbol{\varepsilon}_H^1, \boldsymbol{\varepsilon}_H^2$.

Pasul N3. Se execută un experiment de gradient pentru estimarea gradientului primilor trei termeni din (13) care provin de la $\mathbf{E}_{j_R}^T \mathbf{E}_{j_R}$.

Pasul N4. Se execută un experiment de gradient pentru estimarea gradientului (15) corespunzând la jumătate din restricții, folosind $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_G^1$ în (15).

Pasul N5. Este efectuat un alt experiment de gradient pentru estimarea gradientului funcției barieră, corespunzător celorlalte restricții, folosind $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_G^2$ în (15).

Pasul N6. Se calculează gradientul (16) și se evaluează Hessianul (17) folosind $\mathbf{T}, \mathbf{S}_{ur}$ și $\boldsymbol{\varepsilon}_H^1, \boldsymbol{\varepsilon}_H^2$. Se actualizează referința după legea recurentă

$$\mathbf{R}^{j_R+1} = \mathbf{R}^{j_R} - \gamma_i \cdot \mathbf{H}^{-1} \cdot \left. \frac{\partial \tilde{J}}{\partial \mathbf{R}} \right|_{\mathbf{R}=\mathbf{R}^{j_R}}. \quad (18)$$

Se actualizează $i = i + 1, j_R = j_R + 1$.

Pasul N7. Dacă căutarea Newton este finalizată se sare la pasul următor, altfel se sare la pasul N2.

Pasul B2. Dacă căutarea este satisfăcătoare cu κ curent, algoritmul este terminat. Altfel se actualizează $\kappa^{j_\kappa+1} = \kappa^{j_\kappa} / \mu, j_\kappa = j_\kappa + 1$, și se sare la pasul B1.

Rezultatele experimentale și de simulare sprijină cu succes ideea de optimizare a semnalului de referință în problema RTT [R1]. În concluzie, această abordare poate fi folosită cu succes în diverse aplicații.

F. TEHNICĂ NOUĂ DE ACORDARE A REGULATOARELOR SRA CU PROCESE NELINIARE UTILIZÂND ABORDARI DE TIP IFT, ILC ȘI REȚELE NEURONALE

În perioada ianuarie 2013-octombrie 2013 au fost studiate diverse probleme legate atât de îmbunătățirea tehnicilor iterative cât și de combinarea acestor tehnici cu regulatoare de tip fuzzy. Astfel au fost studiate: aplicarea IFT pentru sisteme de reglare cu reacție după stare [R3], implementarea IFT pe echipament de laborator (sistem cu 3 rezervoare verticale, sistem aerodinamic) [R2],[R3], asigurarea stabilității și convergenței tehnicii IFT folosită pentru acordarea regulatoarelor fuzzy [P1] și altele cu rezultate diseminate conform capitolului G.

Fie sistemul de reglare automată (SRA) în timp discret caracterizat de ecuațiile neliniare ale procesului condus și ale regulatorului:

$$\begin{aligned} y(k) &= P(y(k-1), \dots, y(k-n_{y1}), u(k-1), \dots, u(k-n_{u1})) + v(k), \\ u(k) &= C(\mathbf{p}, u(k-1), \dots, u(k-n_{u2}), y(k), \dots, y(k-n_{y2}), r(k), \dots, r(k-n_r)), \end{aligned} \quad (1)$$

în care y reprezintă mărimea de ieșire reglată, u este semnalul de intrare de comandă, r este semnalul de referință la intrarea sistemului de reglare automată, v poate fi interpretată ca și o perturbație aleatoare de medie nulă care acționează pe ieșire și poate reprezenta astfel o clasă mare de perturbații pe procesul condus, și $\mathbf{p} \in \mathbf{R}^{n_p}$ este vectorul de parametri ai regulatorului. Funcțiile neliniare P și C în (1) reprezintă un model tipic neliniar auto regresiv cu intrări exogene (NARX).

Trebuie formulate câteva ipoteze în legătură cu relația (1). SRA în circuit închis se consideră stabil iar funcțiile neliniare P și C se consideră a fi netede. Fie o traiectorie nominală a sistemului de reglare notată ca $\{r_n(k), u_n(k), y_n(k)\}$, $k = 0 \dots N$, în care N reprezintă lungimea experimentului. Se notează în continuare variațiile în jurul traiectoriei nominale cu $\Delta r(k) = r(k) - r_n(k)$ pentru semnalul de referință, cu $\Delta u(k) = u(k) - u_n(k)$ pentru intrarea de comandă și cu $\Delta y(k) = y(k) - y_n(k)$ pentru ieșirea reglată.

Obiectivul în acordarea automată a reglatoarelor este reprezentat de găsirea acelor valori pentru parametrii regulatorului care reprezintă soluția unei probleme de optimizare, pornind de valoarea inițială \mathbf{p}_0 a acestor parametri:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* &= \arg \min_{\mathbf{p} \in D_S} J(\mathbf{p}), \\ J(\mathbf{p}) &= \frac{1}{2N} E \left\{ \sum_{k=1}^N [(y(k) - y^d(k))^2 + \lambda u^2(k)] \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

subject to system dynamics (1) and to some operational constraints,

în care D_S reprezintă domeniul parametrilor \mathbf{p} pentru care sistemul de reglare rămâne stabil. Restricțiile operaționale pot fi introduse de cele mai multe ori sub forma restricțiilor de tip inegalitate pentru mărimile $u(k)$ și $y(k)$, și pentru derivatele acestora în raport cu timpul, $\Delta u(k)$ și respectiv $\Delta y(k)$, iar aceste restricții depind de contextul aplicației. Formularea problemei de optimizare ca în relația (2) țintește urmărirea unei traiectorii de referință y^d penalizând în același timp efortul la nivelul comenzii cu o pondere $\lambda \geq 0$ care reprezintă un grad de libertate în proiectare, iar speranța matematică $E\{\dots\}$ este introdusă în raport cu perturbația aleatoare v . Pentru a rezolva această problemă de optimizare specifică relației (2) în cazul în care nu avem restricții, putem folosi un algoritm recursiv de căutare stochastică

$$\mathbf{p}_{j+1} = \mathbf{p}_j - \gamma_j \mathbf{R}_j^{-1} \text{est} \left\{ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{p}} \Big|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_j} \right\}, \quad (3)$$

în care direcția de căutare este conținută în estimatorul gradientului funcției obiectiv în raport cu parametrii regulatorului. În acest sens, se poate folosi și informație de ordinul doi, reprezentată spre exemplu de o aproximare de tip Gauss-Newton a Hessian-ului funcției obiectiv, în matricea \mathbf{R}_j . $j \in \mathbf{N}$ în (3) reprezintă indexul iterației curente iar $\gamma_j > 0$, reprezintă un coeficient de scalare al pasului algoritmului de căutare.

Inovația principală a IFT [1], este aceea că informația de gradient poate fi obținută din experimente speciale realizate pe bucla de reglare fără a folosi în mod explicit un model al procesului condus. În același timp însă sunt necesare regimuri de experimentare diferite de regimul nominal. Aceste experimente generează gradientii mărimilor y și u în raport cu parametrii regulatorului, adică $\partial y / \partial \mathbf{p}$ și $\partial u / \partial \mathbf{p}$, care apoi sunt folosite pentru a reconstitui gradientul funcției obiectiv și eventual matricea \mathbf{R}_j . Deși în tehnica IFT originală este invocată ipoteza de linearitate, aplicațiile dovedesc că tehnica funcționează și în cazul proceselor neliniare. Gradientul funcției obiectiv poate fi estimat conform [21], nu prin injectarea unor mărimi în bucla de reglare, nici prin aproximarea derivatelor cu diferențe finite prin modificarea parametrilor regulatorului, ci prin perturbarea traiectoriei de referință nominală folosind semnale de amplitudine mică. Această abordare permite extinderea tehnicii IFT la SRA neliniare.

Această abordare are două avantaje. În primul rând, bucla de reglare nu este modificată pentru experimentele de gradient. În al doilea rând, experimentele de gradient vor fi foarte apropiate de regimul nominal astfel încât nu se pierde funcționarea cvasi-nominală a sistemului de reglare. Motivarea este reluată conform [22]. Fie deviațiile în jurul traiectoriilor nominale exprimate după dezvoltarea în serie Taylor de forma

$$\begin{aligned} u(k) &= u_n(k) + \sum_{i=1}^{n_{u2}} \frac{\partial C}{\partial u(k-i)} \Big|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \mathbf{p}\}} \Delta u(k-i) + \sum_{i=0}^{n_{y2}} \frac{\partial C}{\partial y(k-i)} \Big|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \mathbf{p}\}} \Delta y(k-i) + \sum_{i=0}^{n_r} \frac{\partial C}{\partial r(k-i)} \Big|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \mathbf{p}\}} \Delta r(k-i) \\ &+ \sum_{h=1}^{n_p} \frac{\partial C}{\partial p_h} \Big|_{\mathbf{p}} \Delta p_j + h.o.t., \\ y(k) &= y_n(k) + \sum_{i=1}^{n_{y1}} \frac{\partial P}{\partial u(k-i)} \Big|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k)\}} \Delta u(k-i) + \sum_{i=0}^{n_{y1}} \frac{\partial P}{\partial y(k-i)} \Big|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k)\}} \Delta y(k-i) + h.o.t. \end{aligned} \quad (4)$$

Se presupune că o modificare relativ mică a mărimii de comandă $\{u_n(k)\}$ este generată în jurul traiectoriei nominale $\{r_n(k), u_n(k), y_n(k)\}$, $k=0..N$, odată generată prin modificarea unui parametru al regulatorului ρ_h , $h=1..n_p$, și altă dată generată prin perturbarea traiectoriei nominale a referinței $\{r_n(k)\}$. Dacă există o perturbație a referinței nominale, $\{\Delta r(k)\}$ care generează aceeași modificare în $\{u_n(k)\}$ ca și atunci când se modifică un parametru al regulatorului, atunci aceeași modificare apare și în jurul ieșirii nominale $\{y_n(k)\}$ și anume $\{\Delta y(k)\}$. Termenii de ordin superior din (4) se neglijează. Dacă se consideră ultimii doi termeni ai expresiei $u(k)$ din (4) de valoare egală, se poate deduce că

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_h} \Big|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \rho\}} \Delta \rho_h = \sum_{i=0}^{n_r} \frac{\partial C}{\partial r(k-i)} \Big|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \rho\}} \Delta r(k-i), \quad (5)$$

de unde poate fi calculată o variație a referinței nominale $\{\Delta r(k)\}$. Pentru un regulator LTI se poate arăta simplu că $\Delta r(k) = S(k) \Delta \rho_h$, cu $S(k)$ un semnal care depinde de traiectoriile nominale și de parametrii regulatorului. Ideea sugerează faptul că putem experimenta sistemul de reglare în jurul traiectoriilor nominale și putem obține același efect în modificările $\{u_n(k)\}$ și $\{y_n(k)\}$ ca și atunci când perturbăm un singur parametru al regulatorului.

În literatură au fost tratate două probleme în acest context, și anume numărul experimentelor de gradient care poate fi destul de mare pentru un număr mare al parametrilor regulatorului și introducerea restricțiilor în problema de optimizare originală. Algoritmul propus de echipa de cercetare arată că este posibilă reducerea sau chiar eliminarea experimentelor de gradient dar și introducerea restricțiilor operaționale prin mecanisme simple de implementat care extind tehnica curentă IFT și o fac să fie și mai atractivă pentru aplicațiile industriale.

Rețelele neuronale pot fi folosite pentru a genera informația de gradient folosind modele identificate pentru sistemul în buclă închisă deci evitând un model direct al procesului condus. Fie aceste modele de la r la y și de la r la u de forma

$$y(k) = M_{ry}(y(k-1), \dots, y(k-n_y), r(k-1), \dots, r(k-n_{ry})), \quad (6)$$

$$u(k) = M_{ru}(u(k-1), \dots, u(k-n_u), r(k-1), \dots, r(k-n_{ru})). \quad (7)$$

Variabilele $\partial y / \partial \rho_h$ și $\partial u / \partial \rho_h$ pot fi estimate prin diferențe finite folosind

$$\frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_h} = \frac{\bar{y}(k, r_n + \mu_h \Delta r_h) - \bar{y}(k, r_n)}{\mu_h \Delta \rho_h}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_h} = \frac{\bar{u}(k, r_n + \mu_h \Delta r_h) - \bar{u}(k, r_n)}{\mu_h \Delta \rho_h}, \quad h=1..n_p, k=0..N,$$

în care se consideră implicit $\Delta \rho_h = 1$ și fiecare numărător din relația (8) poate fi obținut din două simulări: una cu parametrii iterației curente a IFT ρ , și una cu cel de-al h -lea parametru al regulatorului perturbat cu cantitatea $\mu_h \Delta \rho_h$. Scalarii μ_h se aleg automat astfel încât să asigure doar perturbații de mică amplitudine în jurul traiectoriei nominale a referinței $\{r_n(k)\}$. Variabilele \bar{y} și \bar{u} se obțin filtrând nelinier referințele nominale și cele perturbate prin aplicațiile neliniare M_{ry} și respectiv M_{ru} .

O problemă de optimizare particulară care ilustrează introducerea restricțiilor și soluția problemei folosind un algoritm de tip Interior-Point Barrier (IPB) este redat mai jos. Fie problema de optimizare

$$\rho^* = \arg \min_{\rho \in D_s} J(\rho), \quad J(\rho) = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [r(k) - y(k, \rho)]^2, \quad (9)$$

$$\text{subject to } u_{\min}(k) \leq u(k, \rho) \leq u_{\max}(k), \quad k=1..N,$$

care penalizează eroarea de urmărire a referinței $e^2(k, \rho) = [r(k) - y(k, \rho)]^2$, cu e reprezentând eroarea de reglare. Restricțiile pot fi codificate în funcția logaritmică specifică IPB și problema devine una de optimizare fără restricții

$$\rho^* = \arg \min_{\rho \in D_s} \tilde{J}(\rho), \quad \tilde{J}(\rho) = J(\rho) + \kappa \phi(\rho), \quad (10)$$

$$\phi(\rho) = - \sum_{k=1}^N \log[(u_{\max}(k) - u(k, \rho))(u(k, \rho) - u_{\min}(k))],$$

cu $\phi(\rho)$ reprezentând funcția de penalizare a restricțiilor. Gradientul $\tilde{J}(\rho)$ în raport cu ρ_h , $h=1..n_p$, se poate estima astfel:

$$\frac{\partial \tilde{J}}{\partial \rho_h} = - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_h} + \kappa \left(\sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_h} \cdot \frac{1}{u_{\max}(k) - u(k, \rho)} - \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_h} \frac{1}{u(k, \rho) - u_{\min}(k)} \right), \quad (11)$$

și poate fi obținut experimental cu restricțiile evaluate pentru valorile curente ale parametrilor regulatorului. Mai mult decât atât, putem folosi abordarea cu rețelele neuronale pentru a elimina complet și experimentele de gradient.

O aproximare de tip Gauss-Newton a Hessianului funcției obiectiv poate fi de asemenea obținută ignorând derivatele de ordin doi. Elementul (l, m) al matricii \mathbf{R}_j de dimensiune $n_p \times n_p$ este exprimată sub forma

$$\frac{\partial^2 \hat{J}}{\partial \rho_m \partial \rho_l} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_l} + \kappa \left(\sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \rho_l} \cdot \frac{1}{(u_{\max}(k) - u(k, \mathbf{p}))^2} + \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \rho_l} \cdot \frac{1}{(u(k, \mathbf{p}) - u_{\min}(k))^2} \right). \quad (12)$$

G. BIBLIOGRAFIE

G.1. Bibliografie aferentă capitolelor B și C

- [D1] H. Kwakernaak "Robust control and H_∞ optimization - Tutorial paper," *Automatica*, vol. 29, pp. 255–273, March 1993.
- [D2] H. Bourslès "A local small gain theorem for discrete-time systems," in *Proc. 33rd IEEE Conf. Decision and Control*, Lake Buena Vista, FL, USA, 1994, vol. 3, pp. 2137–2138.
- [D3] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E. M. Petriu, St. Preitl, and R.-C. David, "Stable Iterative Feedback Tuning method for servo systems," in *Proc. 20th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2011)*, Gdansk, Poland, 2011, pp. 1943–1948.
- [D4] A.S. Bazanella, M. Gevers, L. Miskovic, and B.D.O. Anderson, "Iterative minimization of H_2 control performance criteria," *Automatica*, vol. 44, pp. 2549–2559, Oct. 2008.
- [D5] L.C. Kammer, "Stability assessment for cautious iterative controller tuning," *Automatica*, vol. 41, pp. 1829–1834, Oct. 2005.
- [D6] B. Wahlberg, M. Barenthin Syberg, and H. Hjalmarsson, "Non-parametric methods for L_2 -gain estimation using iterative experiments," *Automatica*, vol. 46, pp. 1376–1381, Aug. 2010.
- [D7] J. K. Huusom, H. Hjalmarsson, N.K. Poulsen, and S.B. Jorgensen, "A design algorithm using external perturbation to improve Iterative Feedback Tuning convergence," *Automatica*, vol. 47, pp. 2665–2670, 2011.
- [D8] J.K. Huusom, N.K. Poulsen, and S.B. Jørgensen, "Improving convergence of Iterative Feedback Tuning," *Journal of Process Control*, vol. 19, pp. 570–578, Apr. 2009.
- [D9] A. Dehghani, A. Lecchini-Visintini, A. Lanzon, and B.D.O. Anderson, "Validating Controllers for Internal Stability Utilizing Closed-Loop Data," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 54(11), pp. 2719–2725, 2009.
- [D10] K. van Heusden, A. Karimi, D. Bonvin, "Data-driven model reference control with asymptotically guaranteed stability," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 25(4), pp. 331–351, 2011.
- [D11] A. Al Mamun, W.Y. Ho, W.E. Wang, and T.H. Lee, "Iterative Feedback Tuning (IFT) of hard disk drive head positioning servomechanism," in *Proc. 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2007)*, Taipei, Taiwan, 2007, pp. 769–774.
- [D12] A.E. Graham, A.J. Young, and S.Q. Xie, "Rapid tuning of controllers by IFT for profile cutting machines," *Mechatronics*, vol. 17, pp. 121–128, Mar.-Apr. 2007.
- [D13] S. Kissling, Ph. Blanc, P. Myszkorowski and I. Vaclavik, "Application of Iterative Feedback Tuning (IFT) to speed and position control of a servo drive," *Control Engineering Practice*, vol. 17, pp. 834–840, Jul. 2009.
- [D14] F.N. Koumboulis, M.P. Tzamtzi, and C.E. Economakos, "Control of a constant turning force system via step-wise safe switching Iterative Feedback Tuning," in *Proc. 2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2008)*, Hamburg, Germany, 2008, pp. 1416–1424.
- [D15] A.J. McDaid, K.C. Aw, S.Q. Xie, and E. Haemmerle, "Gain scheduled control of IPMC actuators with 'model-free' Iterative Feedback Tuning," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 164, pp. 137–147, Dec. 2010.
- [D16] J.K. Huusom, N.K. Poulsen, and S.B. Jørgensen, "Iterative feedback tuning of uncertain state space systems," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, pp. 461–472, Sep. 2010.
- [D17] M. Heertjes, D. Hennekens, and M. Steinbuch, "MIMO feed-forward design in wafer scanners using a gradient approximation-based algorithm," *Control Engineering Practice*, vol. 18(5), pp. 495–506, 2010.
- [D18] D. Rupp and L. Guzzella, "Iterative Tuning of Internal Model Controllers With Application to Air/Fuel Ratio Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18(1), pp. 177–184, 2010.
- [D19] S. Sommer, P. Muller, and A. Kienle, "Iterative Feedback Tuning of PID Controllers for Reactive Distillation Processes: a Comparison with Relay Feedback Tuning," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 50(16), pp. 9821–9828, 2011.
- [D20] D. Liu, A.J. McDaid, K.C. Aw, and S.Q. Xie, "Position control of an Ionic Polymer Metal Composite actuated rotary joint using Iterative Feedback Tuning," *Mechatronics*, vol. 21(1), pp. 315–328, 2011.

G.2. Bibliografie aferentă capitolelor D și E

- [1] M. Ikeda, Y. Fujisaki, and N. Hayashi, "A model-less algorithm for tracking control based on input-output data," *Nonlinear Anal. Theory Methods Appl.*, vol. 47, pp. 1953–1960, Aug. 2001.
- [2] I. Markovsky and P. Rapisarda, "Data-driven simulation and control," *Int. J. Control*, vol. 81, pp. 1946–1959, Dec. 2008.
- [3] M. Helle and H. Saxén, "Data-driven analysis of sulfur flows and behavior in the blast furnace," *Steel Res. Int.*, vol. 79, pp. 671–677, Sep. 2008.
- [4] J. Zeng, C. Gao, and H. Su, "Data-driven predictive control for blast furnace ironmaking process," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 34, pp. 1854–1862, Nov. 2010.
- [5] D. Wang, "Robust data-driven modeling approach for real-time final product quality prediction in batch process operation," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 7, pp. 371–377, May 2011.

- [6] C. Gao, L. Jian, X. Liu, and J. Chen, "Data-driven modeling based on Volterra series for multidimensional blast furnace system," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 22, pp. 2272–2283, Dec. 2011.
- [7] H. Hjalmarsson, M. Gevers, S. Gunnarsson, and O. Lequin, "Iterative feedback tuning: theory and applications," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 18, pp. 26–41, Aug. 1998.
- [8] A. Karimi, L. Miskovic, and D. Bonvin, "Iterative correlation-based controller tuning," *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, vol. 18, pp. 645–664, Oct. 2004.
- [9] L. C. Kammer, "Stability assessment for cautious iterative controller tuning," *Automatica*, vol. 41, pp. 1829–1834, Oct. 2005.
- [10] R.-E. Precup, C. Borchescu, M.-B. Rădac, S. Preitl, C.-A. Dragoș, E. M. Petriu, and J. K. Tar, "Implementation and signal processing aspects of iterative regression tuning," in *Proc. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010)*, Bari, Italy, 2010, pp. 1657–1662.
- [11] J. C. Spall and J. A. Cristion, "Model-free control of nonlinear stochastic systems with discrete-time measurements," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 43, pp. 1198–1210, Sep. 1998.
- [12] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E. M. Petriu, and S. Preitl, "Application of IFT and SPSA to servo system control," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 22, pp. 2363–2375, Dec. 2011.
- [13] J. K. Bennighof, S.-H. Chang, and M. Subramaniam, "Minimum time pulse response based control of flexible structure," *J. Guid. Control Dyn.*, vol. 16, pp. 874–881, Oct. 1993.
- [14] G. Shi and R. E. Skelton, "Markov data-based LQG control," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 122, pp. 551–559, Sep. 2000.
- [15] R. Kadali, B. Huang, and A. Rossiter, "A data driven subspace approach to predictive controller design," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, pp. 261–278, Mar. 2003.
- [16] X. Wang, B. Huang, and T. Chen, "Data-driven predictive control for solid oxide fuel cells," *J. Process Control*, vol. 17, pp. 103–114, Feb. 2007.
- [17] X. Lu, H. Chen, P. Wang, and B. Gao, "Design of a data-driven predictive controller for start-up process of AMT vehicles," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 22, pp. 2201–2212, Dec. 2011.
- [18] W. Favoreel, B. De Moor, P. van Overschee, and M. Gevers, "Model-free subspace-based LQG-design," in *Proc. 1999 American Control Conference*, San Diego, CA, USA, 1999, vol. 5, pp. 3372–3376.
- [19] M. C. Campi, A. Lecchini, and S. M. Savaresi, "Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers," *Automatica*, vol. 38, pp. 1337–1346, Aug. 2002.
- [20] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E. M. Petriu, S. Preitl, and R.-C. David, "Stable iterative feedback tuning method for servo systems," in *Proc. 20th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2011)*, Gdansk, Poland, 2011, pp. 1943–1948.
- [21] D. A. Bristow, M. Tharayil, and A. G. Alleyne, "A survey of iterative learning control," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 26, pp. 96–114, Jun. 2006.
- [22] H.-S. Ahn, Y. Chen, and K. L. Moore, "Iterative learning control: brief survey and categorization," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 37, pp. 1109–1121, Nov. 2007.
- [23] D. H. Owens and J. Hätönen, "Iterative learning control – an optimization paradigm," *Annu. Rev. Control*, vol. 29, pp. 57–70, Apr. 2005.
- [24] S. Gunnarsson and M. Norrlöf, "On the design of ILC algorithms using optimization," *Automatica*, vol. 37, pp. 2011–2016, Dec. 2001.
- [25] M. Norrlöf and S. Gunnarsson, "Time and frequency domain convergence properties in iterative learning control," *Int. J. Control*, vol. 75, pp. 1114–1126, Sep. 2002.
- [26] M. Butcher, A. Karimi, and R. Longchamp, "Iterative learning control based on stochastic approximation," in *Proc. 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008, pp. 1478–1483.
- [27] H.-F. Chen and H.-T. Fang, "Output tracking for nonlinear stochastic systems by iterative learning control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, pp. 583–588, Apr. 2004.

G.3. Bibliografie aferentă capitolului F

- [1] H. Hjalmarsson, M. Gevers, S. Gunnarsson, and O. Lequin, "Iterative feedback tuning: theory and applications," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 18, pp. 26–41, Aug. 1998.
- [2] J.C. Spall and J.A. Cristion, "Model-free control of nonlinear stochastic systems with discrete-time measurements," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 43, pp. 1198–1210, Sep. 1998.
- [3] G. Shi and R.E. Skelton, "Markov data-based LQG control," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 122, pp. 551–559, Sep. 2000.
- [4] M. C. Campi, A. Lecchini, and S. M. Savaresi, "Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers," *Automatica*, vol. 38, pp. 1337–1346, Aug. 2002.
- [5] R. Kadali, B. Huang, and A. Rossiter, "A data driven subspace approach to predictive controller design," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, pp. 261–278, Mar. 2003.
- [6] D. Wang, "Robust data-driven modeling approach for real-time final product quality prediction in batch process operation," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 7, pp. 371–377, May 2011.
- [7] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E.M. Petriu, and S. Preitl, "Application of IFT and SPSA to servo system control," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 22, pp. 2363–2375, Dec. 2011.

- [8] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E.M. Petriu, S. Preitl, and C.-A. Dragoș, "Data-driven reference trajectory tracking algorithm and experimental validation," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, DOI: 10.1109/TII.2012.2220973, Aug. 2012.
- [9] Z.-S. Hou, and Z. Wang, "From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective," *Inf. Sci.*, DOI 10.1016/j.ins.2012.07.014, Aug. 2012.
- [10] S. Formentin and A. Karimi, "A data-driven approach to mixed-sensitivity control with application to an active suspension system," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, DOI: 10.1109/TII.2012.2220556, Sep. 2012.
- [11] H. Saxen, C. Gao, and Z. Gao, "Data-driven time discrete models for dynamic prediction of the hot metal silicon content in the blast furnace - a review," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, DOI: 10.1109/TII.2012.2226897, Nov. 2012.
- [12] R. Chi, Z. Hou, S. Jin, D. Wang, and J. Hao, "A data-driven iterative feedback tuning approach of ALINEA for freeway traffic ramp metering with PARAMICS simulations," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, DOI: 10.1109/TII.2013.2238548, Jan. 2013.
- [13] S. Blažič and I. Škrjanc, "Design and stability analysis of fuzzy model-based predictive control - a case study," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 49, pp. 279–292, Jul. 2007.
- [14] R.-E. Precup, S. Preitl, I.J. Rudas, M.L. Tomescu, and J.K. Tar, "Design and experiments for a class of fuzzy controlled servo systems," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 13, pp. 22–35, Feb. 2008.
- [15] T. Orłowska-Kowalska, M. Kamiński, and K. Szabat, "Implementation of a sliding-mode controller with an integral function and fuzzy gain value for the electrical drive with an elastic joint," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, pp. 1309–1317, Apr. 2010.
- [16] Z.C. Johanyák, "Student evaluation based on fuzzy rule interpolation," *Int. J. Artif. Intell.*, vol. 5, pp. 37–55, Oct. 2010.
- [17] O. Linda and M. Manic, "Self-organizing fuzzy haptic teleoperation of mobile robot using sparse sonar data," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, pp. 3187–3195, Aug. 2011.
- [18] H. Yu, T. Xie, S. Paszczynski, and B.M. Wilamowski, "Advantages of radial basis function networks for dynamic system design," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, pp. 5438–5450, Dec 2011.
- [19] J. Vaščák and M. Paľa, "Adaptation of fuzzy cognitive maps for navigation purposes by migration algorithms," *Int. J. Artif. Intell.*, vol. 8, pp. 20–37, Mar. 2012.
- [20] M.A. Khanesar, E. Kayacan, M. Teshnehlav, and O. Kaynak, "Extended Kalman filter based learning algorithm for type-2 fuzzy logic systems and its experimental evaluation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, pp. 4443–4455, Nov. 2012.
- [21] J. Sjöberg, F. De Bruyne, M. Agarwal, B.D.O. Anderson, M. Gevers, F. J. Kraus, and N. Linard, "Iterative controller optimization for nonlinear systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, pp. 1079–1086, Sep. 2003.
- [22] J. Sjöberg, P.-O. Gutman, M. Agarwal, and M. Bax, "Nonlinear controller tuning based on a sequence of identifications of linearized timevarying models," *Control Eng. Pract.*, vol. 17, no. 2, pp. 311–321, Feb. 2009.

BIBLIOGRAFIE PROPRIE

G.4. Bibliografie proprie în 2011

- lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact:

- [R1] M.-B. Rădac, R.-E. Precup (corresponding author), E. M. Petriu and St. Preitl, Application of IFT and SPSA to servo system control, *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 22, no. 12, part 2, pp. 2363-2375, 2011, ISI SCI impact factor = 2.952, **SCI impact factor in 2012 = 3.766, relative influence score = 2.33890214797136** (*IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* starting with 2012).

- lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale:

- [S1] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș, M.-B. Rădac and E. M. Petriu, State feedback fuzzy control solution for BLDC drives, *Proceedings of 12th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics CINTI 2011, Budapest, Hungary*, pp. 85-90, 2011, indexată INSPEC (IEEE Xplore).

- lucrări publicate în volumele unor conferințe neindexate în baze de date internaționale:

- [P1] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu and St. Preitl, Optimal fuzzy controllers tuned by charged system search algorithms, 2011 Online Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC 16, 10 pp., 2011, premiată cu **Best Paper Award**.

G.5. Bibliografie proprie în 2012

- lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact:

- [H1] T. Haidegger, L. Kovács, R.-E. Precup, B. Benyó, Z. Benyó and St. Preitl, Simulation and control for telerobots in space medicine, *Acta Astronautica (Elsevier Science)*, vol. 181, no. 1, pp. 390-402, 2012, ISI SCI impact factor = 0.701, **SCI impact factor in 2012 = 0.701, relative influence score = 0.806949806949807**.
- [P1] R.-E. Precup, M. L. Tomescu, M.-B. Rădac, E. M. Petriu, St. Preitl and C.-A. Dragoș, Iterative performance improvement of fuzzy control systems for three tank systems, *Expert Systems with Applications (Elsevier Science)*, vol. 39, no. 9, pp. 8288-8299, 2012, ISI SCI impact factor = 1.854, **SCI impact factor in 2012 = 1.854, relative influence score = 1.02625298329356**.
- [P2] Cl. Pozna, N. Minculete, R.-E. Precup (corresponding author), L. T. Kóczy and Á. Ballagi, Signatures: Definitions, operators and applications to fuzzy modeling, *Fuzzy Sets and Systems (Elsevier Science)*, vol. 201,

pp. 86-104, 2012, ISI SCI impact factor = 1.749, **SCI impact factor in 2012 = 1.749, relative influence score = 1.04973357015986.**

- [P3] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, St. Preitl and 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, ISI SCI impact factor = 3.381, **SCI impact factor in 2012 = 3.381, relative influence score = 1.48758465011287.**
- [P4] R.-E. Precup, C.-A. Dragoș, St. Preitl, M.-B. Rădac and E. M. Petriu, Novel tensor product models for automatic transmission system control, IEEE Systems Journal, vol. 6, no. 3, pp. 488-498, 2012, ISI SCI impact factor = 1.270, **SCI impact factor in 2012 = 1.270, relative influence score = 0.832764505119454.**
- [P5] R.-E. Precup, T. Haidegger, St. Preitl, B. Benyó, A. S. Paul and L. Kovács, Fuzzy control solution for telesurgical applications, Applied and Computational Mathematics (Ministry of Communications and Information Technology, Azerbaijan National Academy of Sciences and Institute of Applied Mathematics of Baku State University), vol. 11, no. 3, pp. 378-397, 2012, ISI SCI impact factor = 0.750, **SCI impact factor in 2012 = 0.750.**
- [P6] Cl. Pozna and R.-E. Precup, Aspects concerning the observation process modelling in the framework of cognition processes, Acta Polytechnica Hungarica (Óbuda University), vol. 9, no. 1, pp. 203-223, 2012, ISI SCI impact factor = 0.588, **SCI impact factor in 2012 = 0.588.**
- [P7] R.-E. Precup, M. L. Tomescu, E. M. Petriu, St. Preitl and C.-A. Dragoș, Stable design of a class of nonlinear discrete-time MIMO fuzzy control systems, Acta Polytechnica Hungarica (Óbuda University), vol. 9, no. 2, pp. 57-76, 2012, ISI SCI impact factor = 0.588, **SCI impact factor in 2012 = 0.588.**
- [R1] M.-B. Rădac, R.-E. Precup (corresponding author), E. M. Petriu, St. Preitl and C.-A. Dragoș, Data-driven reference trajectory tracking algorithm and experimental validation, IEEE Transactions on Industrial Informatics, pp. 1-10, DOI: 10.1109/TII.2012.2220973, online first in 2012, ISI SCI impact factor = 3.381, **SCI impact factor in 2012 = 3.381, relative influence score = 1.48758465011287**, va fi indexată în ISI Web of Knowledge.

- lucrări publicate în volume unor conferințe indexate ISI (ISI Proceedings):

- [C1] B.-S. Cerveneak, M.-B. Rădac, R.-E. Precup, A.-I. Stînean, E. M. Petriu, St. Preitl and C.-A. Dragoș, Novel Iterative Formulation of Correlation-Based Tuning, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT 2012, Athens, Greece, pp. 898-903, 2012, indexată ISI Proceedings.
- [D1] C.-A. Dragoș, St. Preitl, R.-E. Precup, E. M. Petriu and A.-I. Stînean, Adaptive Control Solutions for the Position Control of Electromagnetic Actuated Clutch Systems, Proceedings of 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium IEEE IV'12, Alcalá de Henares, Spain, pp. 81-86, 2012, indexată ISI Proceedings.
- [P8] R.-E. Precup, M.-B. Rădac, H.-I. Filip, St. Preitl, C.-A. Dragoș and E. M. Petriu, Signal Processing in Iterative Improvement of Inverted Pendulum Crane Mode Control System Performance, Proceedings of 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC 2012, Graz, Austria, pp. 812-815, 2012, indexată ISI Proceedings.
- [P9] St. Preitl, R.-E. Precup, A.-I. Stînean, C.-A. Dragoș and M.-B. Rădac, Control structures for variable inertia output coupled drives, Proceedings of 4th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics LINDI 2012, Smolenice, Slovakia, pp. 179-184, 2012, indexată SI Proceedings.
- [R2] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E. M. Petriu, B.-S. Cerveneak, C.-A. Dragoș and St. Preitl, Stable Iterative Correlation-Based Tuning Algorithm for Servo Systems, Proceedings of 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2012, Montreal, QC, Canada, pp. 2500-2505, 2012, indexată ISI Proceedings.
- [R3] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E. M. Petriu, St. Preitl and C.-A. Dragoș, Experiment-Based Approach to Reference Trajectory Tracking, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), Part of 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Dubrovnik, Croatia, pp. 470-475, 2012, indexată ISI Proceedings.

- lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale:

- [D2] R.-C. David, R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, C. Purcaru, C.-A. Dragoș and St. 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 DBLP.
- [F1] L.-O. Fedorovici, R.-E. Precup, F. Drăgan, R.-C. David and 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 INSPEC (IEEE Xplore).
- [P10] R.-E. Precup, St. Preitl, A.-I. Stînean, C.-A. Dragoș and M.-B. Rădac, Hybrid Fuzzy Controllers for Non-Minimum Phase Systems, Proceedings of IEEE 7th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2012, Timisoara, Romania, pp. 23-28, 2012, indexată INSPEC (IEEE Xplore).
- [P11] C. Purcaru, D. Iercan, R.-E. Precup, S. Enache, B. Dohangie and L.-O. Fedorovici, nRobotic Applications to Path Planning for Mobile Robots in Missions, Proceedings of 2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing ICSTCC 2012, Sinaia, Romania, paper 43, 6 pp., 2012, indexată INSPEC (IEEE Xplore).

- [R4] M.-B. Rădac, B.-A. Bigher, R.-E. Precup, E. M. Petriu, C.-A. Dragoș, St. Preitl and A.-I. Stînean, Data-based Tuning of PI Controllers for Vertical Three-Tank Systems, Proceedings of 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2012, Rome, Italy, vol. 1, pp. 31-39, 2012, indexată DBLP.
- [S1] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, E. M. Petriu, C.-A. Dragoș and M.-B. Rădac, 2-DOF PI(D) Takagi-Sugeno and Sliding Mode Controllers for BLDC Drives, Proceedings of 15th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia, pp. DS2a.7-1-DS2a.7-6, 2012, indexată INSPEC (IEEE Xplore).
- [S2] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, E. M. Petriu, C.-A. Dragoș and 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, indexată INSPEC (IEEE Xplore).
- [S3] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș and M.-B. Rădac, Hybrid Fuzzy Control Solutions for Brushless DC Drives with Variable Moment of Inertia, Proceedings of IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics SISY 2012, Subotica, Serbia, pp. 317-322, 2012, indexată INSPEC (IEEE Xplore).
- [P12] St. Preitl, A.-I. Stînean, R.-E. Precup, Zs. Preitl, E. M. Petriu, C.-A. Dragoș and M.-B. Rădac, Controller Design Methods for Driving Systems Based on Extensions of Symmetrical Optimum Method with DC and BLDC Motor Applications, Proceedings of 2nd IFAC Conference on Advances in PID Control PID'12, Brescia, Italy, Advances in PID Control, vol. 2, R. Vilanova and A. Visioli, Eds., pp. 264-269, 2012, indexată Scopus.
- [P13] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, St. Preitl and 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, Würzburg, Germany, K. Schilling and E. Leutert, Eds., pp. 115-120, 2012, indexată Scopus.

- *capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag:*

- [D3] R.-C. David, R.-E. Precup, St. Preitl, J. K. Tar and J. Fodor, Three Evolutionary Optimization Algorithms in PI Controller Tuning, in: Applied Computational Intelligence in Engineering and Information Technology, R.-E. Precup, Sz. Kovács, St. Preitl and E. M. Petriu, Eds., Topics in Intelligent Engineering and Informatics, vol. 1 (Springer-Verlag), pp. 95-106, 2012.
- [F2] L.-O. Fedorovici, R.-E. Precup, R.-C. David and 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), pp. 481-504, 2012.
- [P14] St. Preitl, A.-I. Stînean, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș and M.-B. Rădac, 2-DOF and Fuzzy Control Extensions of Symmetrical Optimum Design Method: Applications and Perspectives, in: Applied Computational Intelligence in Engineering and Information Technology, R.-E. Precup, Sz. Kovács, St. Preitl and E. M. Petriu, Eds., Topics in Intelligent Engineering and Informatics, vol. 1 (Springer-Verlag), pp. 19-37, 2012.

G.6. Bibliografie proprie în 2013

- *lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact:*

- [D1] R.-C. David, R.-E. Precup (corresponding author), E. M. Petriu, M.-B. Rădac and St. 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, ISI SCI impact factor = 3.643, **SCI impact factor in 2012 = 3.643, relative influence score = 1.27628865979381.**
- [P1] R.-E. Precup, M.-B. Rădac, M. L. Tomescu, E. M. Petriu and St. Preitl, Stable and convergent iterative feedback tuning of fuzzy controllers for discrete-time SISO systems, Expert Systems with Applications (Elsevier Science), vol. 40, no. 1, pp. 188-199, 2013, ISI SCI impact factor = 1.854, **SCI impact factor in 2012 = 1.854, relative influence score = 1.02625298329356.**
- [P2] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, St. Preitl and M.-B. Rădac, Fuzzy logic-based adaptive gravitational search algorithm for optimal tuning of fuzzy controlled servo systems, IET Control Theory & Applications, vol. 7, no. 1, pp. 99-107, 2013, ISI SCI impact factor = 1.717, **SCI impact factor in 2012 = 1.717, relative influence score = 1.1773220747889.**
- [P3] R.-E. Precup, M. L. Tomescu, St. Preitl, E. M. Petriu, J. Fodor and Cl. Pozna, Stability analysis and design of a class of MIMO fuzzy control systems, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems (IOS Press), vol. 25, no. 1, pp. 145-155, 2013, ISI SCI impact factor = 0.788, **SCI impact factor in 2012 = 0.788, relative influence score = 0.437431991294886.**
- [P4] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, St. Preitl and M.-B. Rădac, Novel Adaptive Charged System Search Algorithm for Optimal Tuning of Fuzzy Controllers, Expert Systems with Applications (Elsevier Science), DOI: 10.1016/j.eswa.2013.07.110, 2013, ISI SCI impact factor = 1.854, **SCI impact factor in 2012 = 1.854, relative influence score = 1.02625298329356**, va fi indexată în ISI Web of Knowledge.
- [R1] M.-B. Rădac, R.-E. Precup (corresponding author), E. M. Petriu and St. Preitl, Experiment-based Performance Improvement of State Feedback Control Systems for Single Input Processes, Acta Polytechnica Hungarica

(Óbuda University), vol. 10, no. 1, pp. 5-24, 2013, ISI SCI impact factor = 0.588, **SCI impact factor in 2012 = 0.588.**

- *lucrare publicată în revistă indexată în baze de date internaționale:*

[P5] R.-E. Precup, C.-A. Dragoș, St. Preitl, E. M. Petriu and M.-B. Rădac, A simple fuzzy control design for powertrain systems with three inertias, *Memoirs of the Scientific Sections of the Romanian Academy* (Editura Academiei Romane, Bucharest), Tome XXXVI, pp. 97-110, 2013, va fi indexată în *Zentrallblatt MATH*.

- *lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale:*

[P6] R.-E. Precup, M.-B. Rădac, E. M. Petriu, C.-A. Dragoș, St. Preitl and A.-I. Stînean, Data-Driven Performance Improvement of Control Systems for Three-Tank Systems, *Proceedings of 2013 6th International Conference on Human System Interactions (HSI 2013)*, Gdansk, Sopot, Poland, pp. 306-311, 2013, indexată INSPEC (IEEE Xplore).

[R2] M.-B. Rădac, R.-C. Roman, R.-E. Precup, E. M. Petriu, C.-A. Dragoș and St. Preitl, Data-based Tuning of Linear Controllers for MIMO Twin Rotor Systems, *Proceedings of IEEE Region 8 EuroCon 2013 Conference*, Zagreb, Croatia, pp. 1915-1920, 2013, IEEE Catalog Number: CFP13EUR-USB, va fi indexată INSPEC (IEEE Xplore).

[R3] M.-B. Rădac, R.-A. Achimescu, R.-E. Precup, St. Preitl, C.-A. Dragoș and A.-I. Stînean, Design and Experiments for Model-Free PI Control of DC Drives, *Proceedings of IEEE 8th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2013*, Timisoara, Romania, pp. 103-108, 2013, indexată INSPEC (IEEE Xplore).

[S1] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș, M.-B. Rădac and E. M. Petriu, Modeling and Control of An Electric Drive System with Continuously Variable Reference, Moment of Inertia and Load Disturbance, *Proceedings of 9th Asian Control Conference ASCC 2013*, Istanbul, Turkey, paper 585, 6 pp., 2013, indexată INSPEC (IEEE Xplore).

[S2] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș, M.-B. Rădac and E. M. Petriu, Low-Cost Neuro-Fuzzy Control Solution for Servo Systems with Variable Parameters, *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications CIVEMSA 2013*, Milano, Italy, pp. 156-161, indexată INSPEC (IEEE Xplore).

[S3] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș, E. M. Petriu and M.-B. Rădac, Solutions to Avoid the Worst Case Scenario in Driving Systems Working Under Continuously Variable Conditions, *Proceedings of IEEE 9th International Conference on Computational Cybernetics ICC 2013*, Tihany, Hungary, pp. 339-344, 2013, indexată INSPEC (IEEE Xplore).

[S4] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș, E. M. Petriu and M.-B. Rădac, 2-DOF Control Solutions for an Electric Drive System under Continuously Variable Conditions, *Proceedings of IEEE 8th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2013*, Timisoara, Romania, pp. 115-120, 2013, indexată INSPEC (IEEE Xplore).

[S5] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș, E. M. Petriu and M.-B. Rădac, Choosing a Proper Control Structure for a Mechatronic System with Variable Parameters, *Preprints of 2nd IFAC Workshop on Convergence of Information Technologies and Control Methods with Power Systems ICPS'13*, Cluj-Napoca, Romania, D. Moga and P. Dobra, Eds., Mediamira Science Publisher, pp. 29-34, 2013, va fi indexată Scopus.

- *capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag:*

[P7] R.-E. Precup, F.-C. Enache, M.-B. Rădac, E. M. Petriu, St. Preitl and C.-A. Dragoș, Lead-Lag Controller-Based Iterative Learning Control Algorithms for 3D Crane Systems, in: *Aspects of Computational Intelligence: Theory and Applications*, L. Madarász and J. Živčák, Eds., *Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, vol. 2 (Springer-Verlag), pp. 25-38, 2013.

[S6] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup, C.-A. Dragoș and M.-B. Rădac, Classical and Fuzzy Approaches to 2-DOF Control Solutions for BLDC-m Drives, in: *Intelligent Systems: Models and Applications*, E. Pap, Ed., *Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, vol. 3 (Springer-Verlag), pp. 175-193, 2013.

PARTEA II. RAPORT ȘTIINȚIFIC PRIVIND IMPLEMENTAREA PROIECTULUI ÎN PERIOADA IANUARIE – DECEMBRIE 2014

A. SINTEZĂ GENERALĂ ASUPRA REZULTATELOR DIN PERIOADA IANUARIE – DECEMBRIE 2014

Principalele obiective urmărite în cadrul proiectului au fost îndeplinite conform planului de activitate și sunt grupate în cele ce urmează sub forma următoarelor obiective și **activități**:

- (1) Introducerea tehnicilor de acordare optimală a reguletoarelor în structuri neconvenționale de reglare automată. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
 - 1.1. Utilizarea tehnicilor iterative și experimentale în acordarea optimală a unor structuri de reglare automată cu reguletoare fuzzy de tip Mamdani și de tip Takagi-Sugeno. Sunt prezentate detalii în capitolul D și rezultatele aferente sunt prezentate în subcapitolul E.4.
 - 1.2. Implementarea și validarea tehnicilor propuse pe echipamentele de laborator. Noile tehnici au fost validate prin simulări și experimente efectuate pe un sistem aerodinamic cu două rotoare din laboratorul în care își desfășoară activitatea echipa de cercetare.

- (2) Exploatarea și diseminarea rezultatelor. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv, cu rezultatele prezentate în subcapitolul E.4, se referă la:
- 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În 2014 au fost publicate 10 lucrări, [R1],[R2] [P1] - [P7], [F1], în reviste cotate ISI cu factor de impact între 6.500 și 0.0, cu scor relativ de influență între 3.908 și 0.
 - 2.2. Participarea și publicarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. În 2014 au fost publicate 8 lucrări științifice [R3]–[R5], [P8] - [P11], în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore), 2 capitole de carte, [P12], [D1], în editura Springer-Verlag.

Principalele rezultate obținute în 2014 sunt:

- 10 lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact, factor de impact cumulat ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2013 Journal Citation Reports = **13.061**, scor relativ de influență cumulat = **11.498**.
- 8 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, Scopus).
- 2 capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag.
- O teză de doctorat, susținută în februarie 2014 de un membru al echipei, Alexandra-Iulia Stînean, sub conducerea unui alt membru al echipei, prof.dr.ing. Stefan Preitl. Teza include capitole cu rezultate raportate în cadrul proiectului.

C. TEHNICĂ NOUĂ DE ACORDARE A REGULATOARELOR SRA CU PROCESE NELINIARE UTILIZÂND ABORDARI DE TIP IFT, ILC ȘI REȚELE NEURONALE

În anii 2013 și 2014 au fost studiate diverse probleme legate atât de îmbunătățirea tehnicilor iterative cât și de combinarea acestor tehnici cu regulatoare de tip fuzzy. Astfel au fost studiate: aplicarea IFT pentru sisteme de reglare cu reacție după stare [R3], implementarea IFT pe echipament de laborator (sistem cu 3 rezervoare verticale, sistem aerodinamic) [R2],[R3], asigurarea stabilității și convergenței tehnicii IFT folosită pentru acordarea regulatoarelor fuzzy [P1] și altele cu rezultate diseminate în 2013.

Fie sistemul de reglare automată (SRA) în timp discret caracterizat de ecuațiile neliniare ale procesului condus și ale regulatorului:

$$y(k) = P(y(k-1), \dots, y(k-n_{y1}), u(k-1), \dots, u(k-n_{u1})) + v(k), \quad (1)$$

$$u(k) = C(\mathbf{p}, u(k-1), \dots, u(k-n_{u2}), y(k), \dots, y(k-n_{y2}), r(k), \dots, r(k-n_r)),$$

în care y reprezintă mărimea de ieșire reglată, u este semnalul de intrare de comandă, r este semnalul de referință la intrarea sistemului de reglare automată, v poate fi interpretată ca și o perturbație aleatoare de medie nulă care acționează pe ieșire și poate reprezenta astfel o clasă mare de perturbații pe procesul condus, și $\mathbf{p} \in \mathbf{R}^{n_p}$ este vectorul de parametri ai regulatorului. Funcțiile neliniare P și C în (1) reprezintă un model tipic nelinier auto regresiv cu intrări exogene (NARX).

Trebuie formulate câteva ipoteze în legătură cu relația (1). SRA în circuit închis se consideră stabil iar funcțiile neliniare P și C se consideră a fi netede. Fie o traiectorie nominală a sistemului de reglare notată ca $\{r_n(k), u_n(k), y_n(k)\}$, $k = 0 \dots N$, în care N reprezintă lungimea experimentului. Se notează în continuare variațiile în jurul traiectoriei nominale cu $\Delta r(k) = r(k) - r_n(k)$ pentru semnalul de referință, cu $\Delta u(k) = u(k) - u_n(k)$ pentru intrarea de comandă și cu $\Delta y(k) = y(k) - y_n(k)$ pentru ieșirea reglată.

Obiectivul în acordarea automată a regulatoarelor este reprezentat de găsirea acelor valori pentru parametrii regulatorului care reprezintă soluția unei probleme de optimizare, pornind de valoarea inițială \mathbf{p}_0 a acestor parametri:

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p} \in D_S} J(\mathbf{p}), \quad (2)$$

$$J(\mathbf{p}) = \frac{1}{2N} E \left\{ \sum_{k=1}^N [(y(k) - y^d(k))^2 + \lambda u^2(k)] \right\},$$

subject to system dynamics (1) and to some operational constraints,

în care D_S reprezintă domeniul parametrilor \mathbf{p} pentru care sistemul de reglare rămâne stabil. Restricțiile operaționale pot fi introduse de cele mai multe ori sub forma restricțiilor de tip inegalitate pentru mărimile $u(k)$ și $y(k)$, și pentru derivatele acestora în raport cu timpul, $\Delta u(k)$ și respectiv $\Delta y(k)$, iar aceste restricții depind de contextul aplicației. Formularea problemei de optimizare ca în relația (2) țintește urmărirea unei traiectorii de referință y^d penalizând în același timp efortul la nivelul comenzii cu o pondere $\lambda \geq 0$ care reprezintă un grad de libertate în proiectare, iar speranța matematică $E\{\dots\}$ este introdusă în raport cu perturbația aleatoare v . Pentru a rezolva această problemă de optimizare specifică relației (2) în cazul în care nu avem restricții, putem folosi un algoritm recursiv de căutare stohastică

$$\mathbf{p}_{j+1} = \mathbf{p}_j - \gamma_j \mathbf{R}_j^{-1} \text{est} \left\{ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{p}} \Big|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_j} \right\}, \quad (3)$$

în care direcția de căutare este conținută în estimatorul gradientului funcției obiectiv în raport cu parametrii regulatorului. În acest sens, poate fi folosită informație de ordinul doi, reprezentată spre exemplu de o aproximare de tip Gauss-Newton a Hessian-ului funcției obiectiv, în matricea \mathbf{R}_j . $j \in \mathbf{N}$ în (3) reprezintă indexul iterației curente iar $\gamma_j > 0$, reprezintă un coeficient de scalare al pasului algoritmului de căutare.

Inovația principală a IFT [1], este aceea că informația de gradient poate fi obținută din experimente speciale realizate pe bucla de reglare fără a folosi în mod explicit un model al procesului condus. În același timp însă sunt necesare regimuri de experimentare diferite de regimul nominal. Aceste experimente generează gradientii mărimilor y și u în raport cu parametrii regulatorului, adică $\partial y / \partial \mathbf{p}$ și $\partial u / \partial \mathbf{p}$, care apoi sunt folosite pentru a reconstitui gradientul funcției obiectiv și eventual matricea \mathbf{R}_j . Deși în tehnica IFT originală este invocată ipoteza de linearitate, aplicațiile dovedesc că tehnica funcționează și în cazul proceselor neliniare. Gradientul funcției obiectiv poate fi estimat conform [1] (subcapitolul E.3), nu prin injectarea unor mărimi în bucla de reglare, nici prin aproximarea derivatelor cu diferențe finite prin modificarea parametrilor regulatorului, ci prin perturbarea traiectoriei de referință nominală folosind semnale de amplitudine mică. Această abordare permite extinderea tehnicii IFT la SRA neliniare.

Această abordare are două avantaje. În primul rând, bucla de reglare nu este modificată pentru experimentele de gradient. În al doilea rând, experimentele de gradient vor fi foarte apropiate de regimul nominal astfel încât nu se pierde funcționarea cvasi-nominală a sistemului de reglare. Motivarea este reluată conform [2] (subcapitolul E.3). Fie deviațiile în jurul traiectoriilor nominale exprimate după dezvoltarea în serie Taylor de forma:

$$u(k) = u_n(k) + \sum_{i=1}^{n_{u2}} \left. \frac{\partial C}{\partial u(k-i)} \right|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \mathbf{p}\}} \Delta u(k-i) + \sum_{i=0}^{n_{y2}} \left. \frac{\partial C}{\partial y(k-i)} \right|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \mathbf{p}\}} \Delta y(k-i) + \sum_{i=0}^{n_r} \left. \frac{\partial C}{\partial r(k-i)} \right|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \mathbf{p}\}} \Delta r(k-i) + \sum_{h=1}^{n_p} \left. \frac{\partial C}{\partial \rho_h} \right|_{\mathbf{p}} \Delta \rho_h + h.o.t., \quad (4)$$

$$y(k) = y_n(k) + \sum_{i=1}^{n_{y1}} \left. \frac{\partial P}{\partial u(k-i)} \right|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k)\}} \Delta u(k-i) + \sum_{i=0}^{n_{y1}} \left. \frac{\partial P}{\partial y(k-i)} \right|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k)\}} \Delta y(k-i) + h.o.t.$$

Se presupune că o modificare relativ mică a mărimii de comandă $\{u_n(k)\}$ este generată în jurul traiectoriei nominale $\{r_n(k), u_n(k), y_n(k)\}$, $k = 0 \dots N$, odată generată prin modificarea unui parametru al regulatorului ρ_h , $h = 1 \dots n_p$, și altă dată generată prin perturbarea traiectoriei nominale a referinței $\{r_n(k)\}$. Dacă există o perturbație a referinței nominale, $\{\Delta r(k)\}$ care generează aceeași modificare în $\{u_n(k)\}$ ca și atunci când se modifică un parametru al regulatorului, atunci aceeași modificare apare și în jurul ieșirii nominale $\{y_n(k)\}$ și anume $\{\Delta y(k)\}$. Termenii de ordin superior din (4) se neglijează. Dacă se consideră ultimii doi termeni ai expresiei $u(k)$ din (4) de valoare egală, se poate deduce că:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial \rho_h} \right|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \mathbf{p}\}} \Delta \rho_h = \sum_{i=0}^{n_r} \left. \frac{\partial C}{\partial r(k-i)} \right|_{\{r_n(k), u_n(k), y_n(k), \mathbf{p}\}} \Delta r(k-i), \quad (5)$$

de unde poate fi calculată o variație a referinței nominale $\{\Delta r(k)\}$. Pentru un regulator LTI se poate arăta simplu că $\Delta r(k) = S(k) \Delta \rho_h$, cu $S(k)$ un semnal care depinde de traiectoriile nominale și de parametrii regulatorului. Ideea sugerează faptul că putem experimenta sistemul de reglare în jurul traiectoriilor nominale și putem obține același efect în modificările $\{u_n(k)\}$ și $\{y_n(k)\}$ ca și atunci când perturbăm un singur parametru al regulatorului.

În literatură au fost tratate două probleme în acest context, și anume numărul experimentelor de gradient care poate fi destul de mare pentru un număr mare al parametrilor regulatorului și introducerea restricțiilor în problema de optimizare originală. Algoritmul propus de echipa de cercetare arată că este posibilă reducerea sau chiar eliminarea experimentelor de gradient dar și introducerea restricțiilor operaționale prin mecanisme simple de implementat care extind tehnica curentă IFT și o fac să fie și mai atractivă pentru aplicațiile industriale.

Rețelele neuronale pot fi folosite pentru a genera informația de gradient folosind modele identificate pentru sistemul în buclă închisă deci evitând un model direct al procesului condus. Fie aceste modele de la r la y și de la r la u , exprimate sub forma:

$$y(k) = M_{ry}(y(k-1), \dots, y(k-n_y), r(k-1), \dots, r(k-n_{ry})), \quad (6)$$

$$u(k) = M_{ru}(u(k-1), \dots, u(k-n_u), r(k-1), \dots, r(k-n_{ru})). \quad (7)$$

Variabilele $\partial y / \partial \rho_h$ și $\partial u / \partial \rho_h$ pot fi estimate prin diferențe finite folosind

$$\frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_h} = \frac{\bar{y}(k, r_n + \mu_h \Delta r_h) - \bar{y}(k, r_n)}{\mu_h \Delta \rho_h}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_h} = \frac{\bar{u}(k, r_n + \mu_h \Delta r_h) - \bar{u}(k, r_n)}{\mu_h \Delta \rho_h}, \quad h = 1 \dots n_p, k = 0 \dots N,$$

în care se consideră implicit $\Delta \rho_h = 1$ și fiecare numărător din relația (8) poate fi obținut din două simulări: una cu parametrii iterației curente a IFT \mathbf{p} , și una cu cel de-al h -lea parametru al regulatorului perturbat cu cantitatea $\mu_h \Delta \rho_h$. Scalarii μ_h se aleg automat astfel încât să asigure doar perturbații de mică amplitudine în jurul traiectoriei

nominale a referinței $\{r_n(k)\}$. Variabilele \bar{y} și \bar{u} se obțin filtrând nelinier referințele nominale și cele perturbate prin aplicațiile neliniare M_{ry} și respectiv M_{ru} .

În continuare este prezentată o problemă de optimizare particulară care ilustrează introducerea restricțiilor și soluția problemei folosind un algoritm de tip Interior-Point Barrier (IPB). Fie problema de optimizare:

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p} \in D_S} J(\mathbf{p}), \quad J(\mathbf{p}) = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [r(k) - y(k, \mathbf{p})]^2, \quad (9)$$

$$\text{subject to } u_{\min}(k) \leq u(k, \mathbf{p}) \leq u_{\max}(k), \quad k = 1 \dots N,$$

care penalizează eroarea de urmărire a referinței $e^2(k, \mathbf{p}) = [r(k) - y(k, \mathbf{p})]^2$, cu e reprezentând eroarea de reglare. Restricțiile pot fi codificate în funcția logaritmică specifică IPB și problema devine una de optimizare fără restricții:

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p} \in D_S} \tilde{J}(\mathbf{p}), \quad \tilde{J}(\mathbf{p}) = J(\mathbf{p}) + \kappa \phi(\mathbf{p}), \quad (10)$$

$$\phi(\mathbf{p}) = - \sum_{k=1}^N \log[(u_{\max}(k) - u(k, \mathbf{p}))(u(k, \mathbf{p}) - u_{\min}(k))],$$

cu $\phi(\mathbf{p})$ reprezentând funcția de penalizare a restricțiilor. Gradientul $\tilde{J}(\mathbf{p})$ în raport cu ρ_h , $h = 1 \dots n_\rho$, se poate estima astfel:

$$\frac{\partial \tilde{J}}{\partial \rho_h} = - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_h} + \kappa \left(\sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_h} \cdot \frac{1}{u_{\max}(k) - u(k, \mathbf{p})} - \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_h} \cdot \frac{1}{u(k, \mathbf{p}) - u_{\min}(k)} \right), \quad (11)$$

și poate fi obținut experimental cu restricțiile evaluate pentru valorile curente ale parametrilor regulatorului. Mai mult decât atât, putem folosi abordarea cu rețelele neuronale pentru a elimina complet și experimentele de gradient.

O aproximare de tip Gauss-Newton a Hessianului funcției obiectiv poate fi de asemenea obținută neglijând derivatele de ordin doi. Elementul (l, m) al matricii \mathbf{R}_j de dimensiune $n_\rho \times n_\rho$ este exprimată sub forma

$$\frac{\partial^2 \tilde{J}}{\partial \rho_m \partial \rho_l} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_l} + \kappa \left(\sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_l} \cdot \frac{1}{(u_{\max}(k) - u(k, \mathbf{p}))^2} + \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_l} \cdot \frac{1}{(u(k, \mathbf{p}) - u_{\min}(k))^2} \right). \quad (12)$$

D. TEHNICĂ NOUĂ DE ANTRENARE A REȚELOR NEURONALE FOLOSIND PRINCIPII ILC

Modelele M_{ry} și M_{ru} din relațiile (6) și (7) pot fi avea structura unor rețele neurale și pot fi identificate din datele de intrare-ieșire culese în jurul unei traiectorii nominale de la iterația curentă a algoritmului de optimizare a parametrilor regulatorului.

Pentru antrenarea acestor rețele neurale se poate opta pentru o strategie online (adaptivă) sau offline (de tip batch sau iterativă). Este propusă o nouă tehnică de antrenare a rețelelor neurale folosind o abordare de tip ILC. Această strategie este avantajoasă întrucât pentru optimizarea iterativă a parametrilor reguletoarelor, actualizarea valorilor parametrilor se face între iterații, adică offline. Procedând astfel nu este necesară o putere de calcul mare.

Se va considera în continuare o structură de tip feedforward a unei rețele neurale cu un singur strat ascuns în care fiecare neuron este caracterizat de o funcție de activare de tip tangentă hiperbolică iar stratul de ieșire conține un singur neuron cu funcție de activare lineară. Relația între intrările și ieșirea rețelei este:

$$\hat{y}(k+1) = \mathbf{W}^T(k) \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{V}(k), \mathbf{x}(k)), \quad (13)$$

în care $\mathbf{W}^T = [w_0 \quad w_1 \quad \dots \quad w_H] \in \mathbf{R}^{H+1}$ este vectorul ponderilor din stratul de ieșire, $\boldsymbol{\sigma}^T = [1 \quad \sigma_1(\mathbf{V}_1^T \mathbf{x}) \quad \dots \quad \sigma_H(\mathbf{V}_H^T \mathbf{x})]$ este vectorul ieșirilor neuronilor din stratul ascuns, caracterizați de funcția de activare de tip tangentă hiperbolică $\sigma_m(x) = \tanh(x)$, $m = 1 \dots H$, iar indicele superior T indică operația de transpunere a unei matrice. Primul element al vectorului coloană $\boldsymbol{\sigma}$ corespunde bias-ului aferent neuronului din stratul de ieșire. Fiecare neuron din stratul ascuns este la rândul său parametrizat de către ponderile aferente conținute în vectori de tipul $(\mathbf{V}^m)^T = [v_m^0 \quad v_m^1 \quad \dots \quad v_m^m] \in \mathbf{R}^{m+1}$, $m = 1 \dots H$, care înmulțesc la rândul lor vectorul intrărilor rețelei $\mathbf{x}^T = [x_0 \quad x_1 \quad \dots \quad x_m]$. Fiecare vector \mathbf{V}^m include ponderea v_m^0 aferentă bias-ului celui de-al m -lea neuron. Aici $nu + 1$ reprezintă numărul intrărilor în rețea iar H este numărul neuronilor din stratul ascuns. Se consideră timpul discret indexat de $k = 0 \dots N$.

Rețeaua neurală este privită ca un sistem dinamic nelinier multivariabil la intrare și la ieșire care evoluează în domeniul iterațiilor

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{j+1} &= \mathbf{W}_j + \mathbf{u}_j^w, \\ \mathbf{V}_{j+1}^i &= \mathbf{V}_j^i + \mathbf{u}_j^v, \quad i = 1 \dots H, \\ \mathbf{Y}_j(k+1) &= \mathbf{W}_j^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{V}_j^i, \mathbf{x}(k)), \quad k = 0 \dots N, \end{aligned} \quad (14)$$

unde

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}_j^w &= [u_j^{w0} \quad \dots \quad u_j^{wH}]^T \in \mathbf{R}^{H+1}, \\
\mathbf{u}_j^v &= [u_j^{v0} \quad \dots \quad u_j^{vnu}]^T \in \mathbf{R}^{nu+1}, \\
\mathbf{Y}_j &= [y_j(1) \quad \dots \quad y_j(N+1)]^T \in \mathbf{R}^{N+1}, \\
\mathbf{X}_j &= [\mathbf{x}_j^T(0) \quad \dots \quad \mathbf{x}_j^T(N)]^T \in \mathbf{R}^{(N+1)(nu+1)},
\end{aligned} \tag{15}$$

unde j este indicele iterației, $\mathbf{u}_j^w, \mathbf{u}_j^v$ sunt vectorii variabilor de intrare, iar vectorii ponderilor $\mathbf{W}_j, \mathbf{V}_j^i$ definiți anterior sunt priviți ca mărimi de stare ale sistemului dinamic (14). Vectorul \mathbf{X}_j poate fi tratat ca o perturbație repetitivă la fiecare iterație însă poate fi tratat și ca un parametru variabil în timp al sistemului nelinear (14). Vectorul \mathbf{Y}_j reprezintă ieșirea sistemului nelinear (14) la fiecare iterație.

Folosind cadrul de analiză oferit de tehnicile de tip ILC, sistemul dinamic (14) este privit în continuare ca și o aplicație statică dinspre intrări spre ieșiri. ILC are ca și obiectiv minimizarea erorii de urmărire dintre ieșirea de la iterația curentă și o ieșire dorită iar acest lucru se poate obține modificând intrarea în mod corespunzător, la fiecare iterație. Vectorul ieșirii dorite poate fi descris ca $\mathbf{Y}_d = [y_d(1) \dots y_d(N+1)]^T \in \mathbf{R}^{N+1}$, cu $y_d(k)$ – reprezentând eșantioanele dorite ale ieșirii pentru momentele de timp $k = 1 \dots N+1$. Astfel, antrenarea de tip batch a rețelei neurale poate fi privită ca o învățare supervizată care are ca și scop minimizarea erorii de urmărire exprimată ca $\mathbf{E}_j = \mathbf{Y}_j - \mathbf{Y}_d$ și numită și eroare de antrenare. Intrarea sistemului nelinear (14) la fiecare iterație poate fi găsită ca și soluție a unei probleme de optimizare specifică ILC

$$(\mathbf{u}_j^{w*}, \mathbf{u}_j^{v*}) = \arg \min_{\mathbf{u}_j^w, \mathbf{u}_j^v} \|\mathbf{E}_{j+1}^T \mathbf{R} \mathbf{E}_{j+1} + \mathbf{U}_j^T \mathbf{Q} \mathbf{U}_j\|_2^2, \tag{16}$$

unde $\mathbf{U}_j = [(\mathbf{u}_j^w)^T \quad (\mathbf{u}_j^v)^T \quad \dots \quad (\mathbf{u}_j^{vH})^T]^T \in \mathbf{R}^{H+1+H(nu+1)}$ reprezintă super-vectorul tuturor intrărilor, $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T > 0$ și $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$ de dimensiuni corespunzătoare sunt matrici diagonale simetrice și pozitiv definite, $\mathbf{E}_{j+1} = \mathbf{Y}_{j+1} - \mathbf{Y}_d$ este eroarea de urmărire la iterația $j+1$, iar $\|\bullet\|$ este norma Euclidiană a vectorului \bullet . Penalizarea vectorului intrărilor \mathbf{U}_j în (16) are rolul de a preveni efectul de over-fitting în antrenarea rețelei.

Abordarea clasică specifică algoritmului celor mai mici pătrate nelinare este aplicată pentru a obține soluția analitică a problemei de optimizare (9). Linearizarea ieșirilor de la iterația următoare $y_{j+1}(k+1) = \mathbf{W}_{j+1}^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{V}_{j+1}^i, \mathbf{x}(k))$, $k = 0 \dots N$, este efectuată în jurul valorilor stărilor/ponderilor de la iterația curentă $\mathbf{W}_j, \mathbf{V}_j^i$ pentru variații de mică amplitudine $\mathbf{u}_j^w, \mathbf{u}_j^v$ considerând ieșirea ca o funcție nelineară de ponderi $y_{j+1}(k+1) = f(\mathbf{W}_{j+1}, \mathbf{V}_{j+1}^i, \mathbf{x}(k))$, $k = 0 \dots N$, și vectorul $\mathbf{x}(k)$ ca și un vector de parametri de variație cunoscută. Dezvoltarea în serie Taylor se scrie

$$\begin{aligned}
y_{j+1}(k+1) &= \mathbf{W}_j^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{V}_j^i, \mathbf{x}(k)) + \\
&[1 \quad \tanh(\mathbf{V}_j^T \mathbf{x}(k)) \quad \dots \quad \tanh(\mathbf{V}_j^{HT} \mathbf{x}(k))] \mathbf{u}_j^w \\
&+ w_j^1 \frac{4}{(e^{\mathbf{V}_j^T \mathbf{x}(k)} + e^{-\mathbf{V}_j^T \mathbf{x}(k)})^2} \mathbf{x}^T(k) \mathbf{u}_j^v + \dots \\
&+ w_j^H \frac{4}{(e^{\mathbf{V}_j^{HT} \mathbf{x}(k)} + e^{-\mathbf{V}_j^{HT} \mathbf{x}(k)})^2} \mathbf{x}^T(k) \mathbf{u}_j^{vH} + h.o.t.
\end{aligned} \tag{17}$$

Întrucât $y_j(k+1) = \mathbf{W}_j^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{V}_j^i, \mathbf{x}(k))$, și introducând notațiile $g_i(k) = 4/(e^{\mathbf{V}_j^T \mathbf{x}(k)} + e^{-\mathbf{V}_j^T \mathbf{x}(k)})^2$ și $\boldsymbol{\sigma}_j(k) = [1 \quad \tanh(\mathbf{V}_j^T \mathbf{x}(k)) \quad \dots \quad \tanh(\mathbf{V}_j^{HT} \mathbf{x}(k))]^T$, și neglijând termenii de ordin superior din dezvoltarea (17), rezultatul este:

$$\begin{aligned}
y_{j+1}(k+1) &= y_j(k+1) + \boldsymbol{\sigma}_j^T(\mathbf{x}(k)) \mathbf{u}_j^w \\
&+ w_j^1 g_1(k) \mathbf{x}^T(k) \mathbf{u}_j^v + \dots + w_j^H g_H(k) \mathbf{x}^T(k) \mathbf{u}_j^{vH}.
\end{aligned} \tag{18}$$

Rescrierea relației (18) în formă vectorială prin stivuirea eșantioanelor celor $N+1$ ieșiri duce la:

$$\begin{aligned}
\mathbf{Y}_{j+1} &= \mathbf{Y}_j + \boldsymbol{\Psi}_j \mathbf{U}_j, \boldsymbol{\Psi}_j \in \mathbf{R}^{(N+1) \times (H+1+H(nu+1))}, \\
\boldsymbol{\Psi}_j &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\sigma}_j^T(\mathbf{x}(0)) & w_j^1 g_1(0) \mathbf{x}^T(0) & \dots & w_j^H g_H(0) \mathbf{x}^T(0) \\ \boldsymbol{\sigma}_j^T(\mathbf{x}(1)) & w_j^1 g_1(1) \mathbf{x}^T(1) & \dots & w_j^H g_H(1) \mathbf{x}^T(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{\sigma}_j^T(\mathbf{x}(N)) & w_j^1 g_1(N) \mathbf{x}^T(N) & \dots & w_j^H g_H(N) \mathbf{x}^T(N) \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{19}$$

Întrucât $\mathbf{E}_{j+1} = \mathbf{Y}_{j+1} - \mathbf{Y}_d = \mathbf{Y}_j + \boldsymbol{\Psi}_j \mathbf{U}_j - \mathbf{Y}_d = \mathbf{E}_j + \boldsymbol{\Psi}_j \mathbf{U}_j$, problema de optimizare (16) se rescrie sub forma:

$$\mathbf{U}_j^* = \arg \min_{\mathbf{U}_j} \|\mathbf{U}_j^T \mathbf{X} \mathbf{U}_j + 2 \mathbf{Z} \mathbf{U}_j + \mathbf{E}_j^T \mathbf{R} \mathbf{E}_j\|_2^2, \tag{20}$$

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\Psi}_j^T \mathbf{R} \boldsymbol{\Psi}_j + \mathbf{Q}, \mathbf{Z} = \mathbf{E}_j^T \mathbf{R} \boldsymbol{\Psi}_j.$$

Folosind regulile de derivare ale matricelor în raport cu vectori și observând că \mathbf{X} este o matrice simetrică deoarece matricile \mathbf{R} și \mathbf{Q} sunt simetrice, rezultă mai departe că soluția analitică a problemei de optimizare (20) este:

$$\mathbf{U}_j^* = -(\mathbf{X}^T)^{-1} \mathbf{Z}^T = -(\Psi_j^T \mathbf{R} \Psi_j + \mathbf{Q})^{-1} \Psi_j^T \mathbf{R} \mathbf{E}_j = -\mathbf{K}_j \mathbf{E}_j. \quad (21)$$

Matricea \mathbf{K}_j poate fi obținută relativ ușor deoarece matricile Ψ_j, \mathbf{E}_j pot fi calculate la fiecare iterație. Vectorul intrărilor optime conține de fapt corecțiile aplicate ponderilor rețelei neurale. Folosind partiționarea $\mathbf{K}_j = [\mathbf{K}_j^{w^T} \quad \mathbf{K}_j^{v^T} \quad \dots \quad \mathbf{K}_j^{h^T}]^T$ cu dimensiunile matricilor $\mathbf{K}_j^w \in \mathbf{R}^{(H+1) \times (N+1)}$, $\mathbf{K}_j^v \in \mathbf{R}^{(m+1) \times (N+1)}$, primele două ecuații de stare din (14) pot fi rescrise, utilizând (21), sub forma:

$$\mathbf{W}_{j+1} = \mathbf{W}_j - \mathbf{K}_j^w \mathbf{E}_j, \quad (22)$$

$$\mathbf{V}_{j+1}^i = \mathbf{V}_j^i - \mathbf{K}_j^{v^i} \mathbf{E}_j.$$

Legile de actualizare (22) sunt de tip ILC deoarece depind de eroarea de la iterația curentă. Rezolvând problema de optimizare (16) la fiecare iterație corespunzătoare antrenării rețelei, schema de învățare este privită ca și o problema de tip ILC. Formularea problemei de optimizare (16) specifice ILC este foarte generală permițând penalizarea unor corecții de amplitudine mare aplicate ponderilor rețelei și astfel oferă un grad de libertate suplimentar în antrenarea rețelei.

Rezultatele acestei noi abordări în antrenarea rețelelor neurale a fost diseminat în cadrul lucrărilor [R1] și [R2] din subcapitolul E.4.

E. BIBLIOGRAFIE

E.3. Bibliografie aferentă capitolelor C și D

- [1] J. Sjöberg, F. De Bruyne, M. Agarwal, B.D.O. Anderson, M. Gevers, F. J. Kraus, and N. Linard, "Iterative controller optimization for nonlinear systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, pp. 1079–1086, Sep. 2003.
- [2] J. Sjöberg, P.-O. Gutman, M. Agarwal, and M. Bax, "Nonlinear controller tuning based on a sequence of identifications of linearized timevarying models," *Control Eng. Pract.*, vol. 17, no. 2, pp. 311–321, Feb. 2009.

E.4. BIBLIOGRAFIE PROPRIE (în 2014)

- lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact:

- [R1] M.-B. Rădac, R.-E. Precup (corresponding author), E. M. Petriu and St. Preitl, Iterative Data-Driven Tuning of Controllers for Nonlinear Systems with Constraints, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 6360-6368, 2014, impact factor (IF) = 6.500, relative influence score = 3.908.
- [P1] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, M.-B. Rădac and St. 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, relative influence score = 3.240, which corresponds to the previous name of the journal, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*.
- [P2] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, St. Preitl and M.-B. Rădac, Novel Adaptive Charged System Search Algorithm for Optimal Tuning of Fuzzy Controllers, *Expert Systems with Applications (Elsevier Science)*, vol. 41, no. 4, part 1, pp. 1168-1175, 2014, impact factor (IF) = 1.965, relative influence score = 1.250.
- [P3] Cl. Pozna, R.-E. Precup (corresponding author) and P. Földesi, A novel pose estimation algorithm for robotic navigation, *Robotics and Autonomous Systems (Elsevier Science)*, DOI: 10.1016/j.robot.2014.09.034, 2014, impact factor (IF) = 1.105, relative influence score = 1.597.
- [P4] R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, St. Preitl, L.-O. Fedorovici and C.-A. Dragoș, Cascade control system-based cost effective combination of tensor product model transformation and fuzzy control, *Asian Journal of Control (John Wiley and Sons)*, DOI: 10.1002/asjc.855, 2014, impact factor (IF) = 0.000, relative influence score = 0.000.
- [P5] R.-E. Precup and M. L. Tomescu, Stable fuzzy logic control of a general class of chaotic systems, *Neural Computing and Applications (Springer-Verlag)*, DOI: 10.1007/s00521-014-1644-7, 2014, impact factor (IF) = 1.763, relative influence score = 0.511.
- [P6] Cl. Pozna and R.-E. Precup, Applications of Signatures to Expert Systems Modelling, *Acta Polytechnica Hungarica (Óbuda University)*, vol. 11, no. 2, pp. 21-39, 2014, impact factor (IF) = 0.471, relative influence score = 0.264.
- [F1] R. S. Fantana, N. Minculete and R.-E. Precup, Extension of Liskov Substitution Principle and Application to Curriculum Management, *Acta Polytechnica Hungarica (Óbuda University)*, vol. 11, no. 7, pp. 25-42, 2014, impact factor (IF) = 0.471, relative influence score = 0.264.
- [R2] M.-B. Rădac, R.-E. Precup (corresponding author), E. M. Petriu and St. Preitl, Iterative Data-Driven Controller Tuning with Actuator Constraints and Reduced Sensitivity, *Journal of Aerospace Information Systems (The American Institute of Aeronautics and Astronautics)*, vol. 11, no. 9, pp. 551-564, 2014, impact factor (IF) = 0.000, relative influence score = 0.000.

- lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale:

- [P8] R.-E. Precup, M.-B. Rădac, C.-A. Dragoș, St. Preitl and E. M. Petriu, Model-Free Tuning Solution for Sliding Mode Control of Servo Systems, *Proceedings of 8th Annual IEEE International Systems Conference SysCon 2014, Ottawa, ON, Canada*, pp. 30-35, 2014, ISI Proceedings.

- [R3] M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Design and Testing of a Constrained Data-Driven Iterative Reference Input Tuning Algorithm, Proceedings of 2014 European Control Conference ECC 2014, Strasbourg, France, pp. 2034-2039, 2014, INSPEC.
- [P9] R.-E. Precup, A.-L. Borza, M.-B. Rădac and E. M. Petriu, Bacterial Foraging Optimization Approach to the Controller Tuning for Automotive Torque Motors, Proceedings of IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2014, Istanbul, Turkey, pp. 972-977, 2014, INSPEC.
- [P10] R.-E. Precup, A.-L. Borza, M.-B. Rădac and E. M. Petriu, Performance Analysis of Torque Motor Systems with PID Controllers Tuned by Bacterial Foraging Optimization Algorithms, Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications CIVEMSA 2014, Ottawa, ON, Canada, pp. 141-146, 2014, INSPEC.
- [P11] R.-E. Precup, R.-C. David, A.-I. Stînean, M.-B. Rădac and 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, INSPEC.
- [R4] R.-C. Roman, M.-B. Rădac and R.-E. Precup, Data-Driven Model-Free Adaptive Control of Twin Rotor Aerodynamic Systems, Proceedings of IEEE 9th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2014, Timisoara, Romania, 2014, pp. 25-30, INSPEC.
- [S1] A.-I. Stînean, St. Preitl, R.-E. Precup and M. Crainic, Study on Experimental Plant of Positioning Control Solutions for Processes with Variable Moment of Inertia, Proceedings of IEEE 9th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2014, Timisoara, Romania, 2014, pp. 37-42, INSPEC.
- [R5] M.-B. Rădac, R.-C. Roman, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Data-Driven Model-Free Control of Twin Rotor Aerodynamic Systems: Algorithms and Experiments, Proceedings of 2014 IEEE International Symposium on Intelligent Control ISIC 2014 Part of 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control IEEE MSC 2014, Antibes, France, pp. 1889-1894, 2014, IEEE Catalog Number (ISIC): CFP14INS-USB, to be indexed in INSPEC.
- capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag:
- [P12] St. Preitl, R.-E. Precup, Z. Preitl, A.-I. Stînean, M.-B. Rădac and C.-A. Dragoș, Control Algorithms for Plants Operating Under Variable Conditions, Applications, in: Advances in Soft Computing, Intelligent Robotics and Control, J. Fodor and R. Fuller, Eds., Topics in Intelligent Engineering and Informatics, vol. 8 (Springer-Verlag), pp. 3-39, 2014.
- [D1] R.-C. David, R.-E. Precup, E. M. Petriu, St. Preitl, M.-B. Rădac and 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-Verlag), pp. 159-173, 2014.

PARTEA III. RAPORT ȘTIINȚIFIC PRIVIND IMPLEMENTAREA PROIECTULUI ÎN PERIOADA IANUARIE – DECEMBRIE 2015

A. SINTEZĂ GENERALĂ ASUPRA REZULTATELOR DIN PERIOADA IANUARIE – DECEMBRIE 2015

Principalele obiective urmărite în cadrul proiectului au fost îndeplinite conform planului de activitate și sunt grupate în cele ce urmează sub forma următoarelor obiective și **activități**:

- (1) Introducerea tehnicilor de acordare optimală a reguletoarelor în structuri neconvenționale de reglare automată. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
 - 1.1. Utilizarea tehnicilor iterative și experimentale în acordarea optimală a unor structuri de reglare automată cu reguletoare fuzzy de tip Mamdani și de tip Takagi-Sugeno. Sunt prezentate detalii în capitolul D și rezultatele aferente sunt prezentate în subcapitolul E.4.
 - 1.2. Implementarea și validarea tehnicilor propuse pe echipamentele de laborator. Noile tehnici au fost validate prin simulări și experimente efectuate pe un sistem aerodinamic cu două rotoare din laboratorul în care își desfășoară activitatea echipa de cercetare.
- (2) Exploatarea și diseminarea rezultatelor. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv, cu rezultatele prezentate în subcapitolul E.4, se referă la:
 - 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În 2015 au fost publicate 7 lucrări, [R1] - [R3], [P1] - [P4], în reviste cotate ISI cu factor de impact între 4.291 și 0.649, cu scor relativ de influență între 2.741 și 0.
 - 2.2. Participarea și publicarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. În 2015 au fost publicate 4 lucrări științifice [P5], [P6], [R4], [R5], în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore), 2 capitole de carte, [P12], [D1], în editura Springer-Verlag.

Principalele rezultate obținute în 2015 sunt:

- 7 lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact, factor de impact cumulat ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2014 Journal Citation Reports = **12.115**, scor relativ de influență cumulat = **6.47**.

- 3 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, Scopus).

D. METODĂ DE DEZVOLTARE A UNUI REGULATOR DE TIP FUZZY-PI

Se consideră, spre exemplu, un regulator de tip PI în reacție cu un proces neliniar, fixat în urma acordării parametrilor folosind tehnica IFT. În continuare este posibilă obținerea unui regulator echivalent de tip fuzzy PI (PI-FC).

PI-FC reprezintă un regulator numeric construit în jurul unui regulator fuzzy de bază fără dinamică (B-FC), cu dinamica introdusă prin derivarea numerică a erorii de reglare e_k exprimată sub forma incrementului erorii de reglare, $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$, și prin integrarea numerică a incrementului comenzii, Δu_k . În Fig. 4 este prezentată structura PI-FC. Blocul B-FC reprezintă un sistem neliniar cu două intrări și o ieșire, care include între neliniarități și scalarea intrărilor și ieșirilor (în cadrul modulului de fuzzificare). Fuzzificarea este rezolvată utilizând (cel puțin în faza inițială) funcțiile de apartenență de intrare și ieșire cu distribuție uniformă conform Fig. 5. Alte distribuții ale funcțiilor de apartenență pot modifica în mod dorit neliniaritățile regulatorului fuzzy. Mecanismul de inferență al B-FC este de tip MAX-MIN după Mamdani, asistat de baza de reguli ilustrată în Tabelul 1, iar în modulul de defuzzificare este utilizată metoda centrului de greutate pentru singleton-uri.

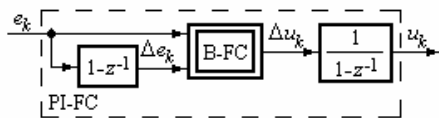


Fig. 4. Structura PI-FC.

Tabelul 1 Tabel de decizie al blocului B-FC

Δe_k	e_k					
	NB	NS	ZE	PS	PB	
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	
PS	NS	ZE	PS	PM	PB	
ZE	NM	NS	ZE	PS	PM	
NS	NB	NM	NS	ZE	PS	
NB	NB	NB	NM	NS	ZE	

Metoda de dezvoltare a PI-FC considerate în cadrul grantului constă în parcurgerea pașilor 1) ... 3):

1) Se transformă regulatorul discret de tip PI acordat prin IFT într-o formă continuă de forma $C(s) = k_c(1+sT_i)/s = k_c[1+1/(sT_i)]$, $k_c = T_i k_e$.

2) Este stabilită valoarea perioadei de eșantionare T_s conform necesităților reglării numerice cvasi-continue, este exprimată ecuația cu tip discret a regulatorului PI în variantă incrementală:

$$\Delta u_k = K_p \cdot \Delta e_k + K_I \cdot e_k = K_p (\Delta e_k + \alpha \cdot e_k), \quad (11)$$

și sunt calculați parametrii $\{K_p, K_I, \alpha\}$. De exemplu, expresiile lor sunt, în cazul metodei Tustin,

$$K_p = k_c [1 - T_s / (2T_i)], K_I = k_c T_s / T_i, \alpha = K_I / K_p = 2T_s / (2T_i - T_s). \quad (12)$$

3) Este aplicat principiul echivalenței modale, particularizat aici sub forma

$$B_{\Delta e} = \alpha B_e, B_{\Delta u} = K_I B_e, \quad (13)$$

în care parametrul liber B_e reprezintă opțiunea proiectantului. Pentru alegerea acestui parametru pot fi luate în considerare necesitatea unui FCS stabil sau analiza sensibilității în raport cu modificările parametrilor procesului condus.

E. BIBLIOGRAFIE

E.3. Bibliografie aferentă capitolelor C și D

- [1] J. Sjöberg, F. De Bruyne, M. Agarwal, B.D.O. Anderson, M. Gevers, F. J. Kraus, and N. Linard, "Iterative controller optimization for nonlinear systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, pp. 1079–1086, Sep. 2003.
- [2] J. Sjöberg, P.-O. Gutman, M. Agarwal, and M. Bax, "Nonlinear controller tuning based on a sequence of identifications of linearized timevarying models," *Control Eng. Pract.*, vol. 17, no. 2, pp. 311–321, Feb. 2009.

E.4. BIBLIOGRAFIE PROPRIE (în 2015)

- lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact:

- [R1] M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Model-Free Primitive-Based Iterative Learning Control Approach to Trajectory Tracking of MIMO Systems With Experimental Validation, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, DOI: 10.1109/TNNLS.2015.2460258, 2015, impact factor (IF) = 4.291.
- [P1] R.-E. Precup and M. L. Tomescu, Stable fuzzy logic control of a general class of chaotic systems, *Neural Computing and Applications (Springer-Verlag)*, vol. 26, no. 3, pp. 541-550, 2015, impact factor (IF) = 1.569.
- [R2] M.-B. Rădac and R.-E. Precup (corresponding author), Data-based two-degree-of-freedom iterative control approach to constrained non-linear systems, *IET Control Theory & Applications*, vol. 9, no. 7, pp. 1000-1010, 2015, impact factor (IF) = 2.048.

- [P2] Cl. Pozna, R.-E. Precup (corresponding author) and P. Földesi, A novel pose estimation algorithm for robotic navigation, *Robotics and Autonomous Systems* (Elsevier Science), vol. 63, pp. 10-21, 2015, impact factor (IF) = 1.256.
- [P3] R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, St. Preitl, L.-O. Fedorovici and C.-A. Dragoș, Cascade control system-based cost effective combination of tensor product model transformation and fuzzy control, *Asian Journal of Control* (John Wiley and Sons), vol. 17, no. 2, pp. 381-391, 2015, impact factor (IF) = 1.556.
- [P4] R.-E. Precup, M. L. Tomescu and E. M. Petriu, A Unified Anti-Windup Technique for Fuzzy and Sliding Mode Controllers, *International Journal of Computers, Communications & Control*, vol. 10, no. 6, pp. 815-827, 2015, impact factor (IF) = 0.746.
- [R3] M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Constrained Data-Driven Model-Free ILC-based Reference Input Tuning Algorithm, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 12, no. 1, pp. 137-160, 2015, impact factor (IF) = 0.649.
- lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale:
- [P5] R.-E. Precup, A.-D. Balint, M.-B. Rădac and E. M. Petriu, Backtracking Search Optimization Algorithm-based approach to PID controller tuning for torque motor systems, *Proceedings of 2015 9th Annual IEEE International Systems Conference SysCon 2015*, Vancouver, BC, Canada, pp. 127-132, 2015, indexed in IEEE Xplore, INSPEC.
- [P6] R.-E. Precup, E.-I. Voişan, E. M. Petriu, M.-B. Rădac and L.-O. Fedorovici, Implementation of Evolving Fuzzy Models of a Nonlinear Process, *Proceedings of 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2015*, Colmar, Alsace, France, vol. 1, pp. 5-14, 2015, indexed in SCOPUS, DBLP.
- [R4] R.-C. Roman, M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Data-Driven Optimal Model-Free Control of Twin Rotor Aerodynamic Systems, *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT 2015*, Seville, Spain, pp. 161-166, 2015, indexed in IEEE Xplore, INSPEC.
- [R5] M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Optimal Motion Prediction Using a Primitive-based Model-Free Iterative Control Approach for Crane Systems, *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT 2015*, Seville, Spain, pp. 366-372, 2015, indexed in IEEE Xplore, INSPEC.

PARTEA IV. RAPORT ȘTIINȚIFIC PRIVIND IMPLEMENTAREA PROIECTULUI ÎN PERIOADA IANUARIE – DECEMBRIE 2016

A. SINTEZĂ GENERALĂ ASUPRA REZULTATELOR DIN PERIOADA IANUARIE – DECEMBRIE 2016

Principalele obiective urmărite în cadrul proiectului au fost îndeplinite conform planului de activitate și sunt grupate în cele ce urmează sub forma următoarelor obiective și **activități**:

- (1) Introducerea tehnicilor de acordare optimală a reguletoarelor în structuri neconvenționale de reglare automată. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
 - 1.1. Utilizarea tehnicilor iterative și experimentale în acordarea optimală a unor structuri de reglare automată cu reguletoare fuzzy de tip Mamdani și de tip Takagi-Sugeno. Sunt prezentate detalii în secțiunile B și C iar rezultatele de publicare aferente sunt prezentate în secțiunea D.3.
 - 1.2. Implementarea și validarea tehnicilor propuse pe echipamentele de laborator. Noile tehnici au fost validate prin simulări și experimente efectuate pe un sistem aerodinamic cu două rotoare din laboratorul în care își desfășoară activitatea echipa de cercetare.
- (2) Exploatarea și diseminarea rezultatelor. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv, cu rezultatele prezentate în secțiunea D.3, se referă la:
 - 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În 2016 au fost publicate 4 lucrări, [R1] - [R4], în reviste cotate ISI cu factor de impact între 2.368 și 0.544, cu scor relativ de influență între 1,957 și 0.264. De asemenea, au fost publicate două lucrări [R5], [P1], în capitole de carte la editura Springer International Publishing.
 - 2.2. Participarea și publicarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. În 2016 au fost publicate 7 lucrări științifice [R6], [P2] - [P4], [T1], [B1], [H1] în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, Scopus, DBLP).

Principalele rezultate obținute în 2016 sunt:

- 4 lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact, factor de impact cumulat ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2014 Journal Citation Reports = **6.546**, scor relativ de influență cumulat = **4.227**.
- 7 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, Scopus, DBLP).
- 2 capitole de carte la editura Springer International Publishing.

B. METODĂ DE PROIECTARE OPTIMALĂ A SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ FUZZY DE TIP TAKAGI-SUGENO CU SENSIBILITATE PARAMETRICĂ REDUSĂ, FOLOSIND ALGORITMI EVOLUTIVI ITERATIVI EXPERIMENTALI BAZAȚI PE DATE

În cadrul studiului de cercetare am ales pentru procesul condus un model ISI cu o singură intrare și o singură ieșire (SISO):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_p &= \mathbf{f}_p(\mathbf{x}_p, \mathbf{a}, u, d), \\ y &= g_p(\mathbf{x}_p, \mathbf{a}, d), \\ \mathbf{x}_p(t_0) &= \mathbf{x}_{p,0}, \end{aligned} \quad (1)$$

în care $t_0 \geq 0$ este momentul inițial de timp, $\mathbf{x}_p = [x_{p,1} \ x_{p,2} \ \dots \ x_{p,n}]^T \in R^n$ este vectorul de stare al procesului condus, $\mathbf{x}_{p,0} \in R^n$ este vectorul de stare inițial al procesului condus, u este comanda, d este perturbația, y este ieșirea reglată, $\mathbf{a} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_m]^T \in R^m$ este vectorul care conține parametrii procesului condus, $\alpha_j, j = \overline{1, m}$, $\mathbf{f}_p : R^{n \times m \times 1} \rightarrow R^n$, $g_p : R^{n \times m \times 1} \rightarrow R$ sunt funcții derivabile în raport cu \mathbf{a} , exponentul T este notația generală utilizată pentru operație de transpunere a matricelor, iar variabila independentă timp $t, t \geq t_0$, este omisă pentru a simplifica prezentarea.

Modelul (1) include dinamici pentru măsurarea elementelor și actuatorilor. În fig. 1 este prezentată structura unui sistem de reglare convențional în care C este regulatorul, P este procesul condus, r este intrarea de referință și e este eroarea de reglare:

$$e = r - y, \quad (2)$$

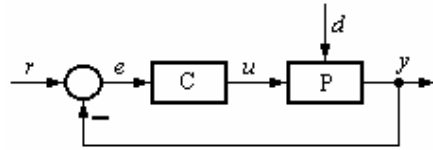


Fig. 1. Structura sistemului de reglare automată.

Regulatorul este reprezentat de către următorul model de stare SISO:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_c &= \mathbf{f}_c(\mathbf{x}_c, \beta, e), \\ u &= g_c(\mathbf{x}_c, \beta, e), \\ \mathbf{x}_c(t_0) &= \mathbf{x}_{c,0}, \end{aligned} \quad (3)$$

în care $\mathbf{x}_c = [x_{c,1} \ x_{c,2} \ \dots \ x_{c,p}]^T \in R^p$ este vectorul de stare al regulatorului, $\mathbf{x}_{c,0} \in R^p$ este vectorul de stare inițial al regulatorului, β este un parametru de proiectare iar $\mathbf{f}_c : R^{p \times q \times 1} \rightarrow R^p$, $g_c : R^{p \times q \times 1} \rightarrow R$ sunt funcții continue. Trebuie menționat că majoritatea reguletoarelor lineare [B18] și multe reguletoare nelineare, inclusiv reguletoare fuzzy, pot fi aduse în anumite condiții [B19] sub forma modelului prezentat în relația (3). În orice aplicație este necesar, din motivul de convergență a integralelor din funcțiile obiectiv, ca toate reguletoarele să aibă o componentă integrală pentru a asigura valoarea nulă de regim staționar constant a erorii de reglare atunci când sunt aplicate diverse clase de intrări perturbatoare.

Pentru a defini modelul de stare al sistemului de reglare automată, elementele celor doi vectori de stare din modelele (1) și (3) sunt grupate în următorul vector de stare \mathbf{x} a sistemului de reglare automată:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{x}_c \end{bmatrix} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n+p}]^T \in R^{n+p}, \\ x_i &= \begin{cases} x_{p,i} & \text{dacă } i = \overline{1, n} \\ x_{c,i-n} & \text{altfel} \end{cases}, \quad i = \overline{1, n+p}. \end{aligned} \quad (4)$$

În continuare modelul de stare ale procesului condus și cel al regulatorului din relațiile (1) și (3) sunt unite folosind relația (2) și structura de sistem prezentată în fig. 1. Astfel, modelul de stare al sistemului de reglare automată devine

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{f}_p\{\mathbf{x}_p, \mathbf{a}, g_c[\mathbf{x}_c, \beta, r - g_p(\mathbf{x}_p, \mathbf{a}, d)], d\} \\ \mathbf{f}_c[\mathbf{x}_c, \beta, r - g_p(\mathbf{x}_p, \mathbf{a}, d)] \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{a}, \beta, r, d) = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_{n+p}]^T \in R^{n+p}, \\ y &= g_p(\mathbf{x}_p, \mathbf{a}, d), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{x}(t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{p,0} \\ \mathbf{x}_{c,0} \end{bmatrix}.$$

Considerînd că $\alpha_j, j = \overline{1, m}$ este un parametru oarecare al procesului condus, în continuare sunt definite funcțiile de sensibilitate ale stării $\lambda_i^{\alpha_j}, i = \overline{1, n+p}$ și funcția de sensibilitate a ieșirii σ^{α_j} după cum urmează:

$$\lambda_i^{\alpha_j} = \left[\frac{\partial x_i}{\partial \alpha_j} \right]_{\alpha_j,0}, \quad \sigma^{\alpha_j} = \left[\frac{\partial y}{\partial \alpha_j} \right]_{\alpha_j,0}, \quad i = \overline{1, n+p}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

în care indicele inferior 0 indică valoarea nominală a parametrului luat în considerare. Folosind relațiile (6) pentru a calcula derivatele parțiale în modelul (5), se obțin modelele de sensibilitate ale sistemului de reglare automată pentru $\alpha_j, j = \overline{1, m}$, intrarea de referință r_0 și intrarea de perturbație d_0 :

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_i^{\alpha_j} &= \sum_{k=1}^{n+p} \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_k} \right]_{\alpha_j,0} \lambda_k^{\alpha_j} + \left[\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_j} \right]_{\alpha_j,0}, \\ \sigma^{\alpha_j} &= \sum_{k=1}^n \left[\frac{\partial g_p}{\partial x_k} \right]_{\alpha_j,0} \lambda_k^{\alpha_j} + \left[\frac{\partial g_p}{\partial \alpha_j} \right]_{\alpha_j,0}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\lambda_i^{\alpha_j}(t_0) = 0, \quad i = \overline{1, n+p}, \quad j = \overline{1, m}.$$

Valorile inițiale ale funcțiilor de sensibilitate sunt extrem de importante în analiza modelelor de sensibilitate definite în relația (7). Pentru a obține o bună dinamică a sistemelor de reglare și o sensibilitate redusă, definim următoarele funcții obiectiv cu parametrul de proiectare β ca variabilă independentă:

- ISE extins:

$$I_{ISE}^{\alpha_j}(\beta) = \int_0^{\infty} \{e^2(t) + (\gamma^{\alpha_j})^2 [\sigma^{\alpha_j}(t)]^2\} dt, \quad j = \overline{1, m}, \quad (8)$$

- IAE extins:

$$I_{IAE}^{\alpha_j}(\beta) = \int_0^{\infty} \{|e(t)| + (\gamma^{\alpha_j})^2 [\sigma^{\alpha_j}(t)]^2\} dt, \quad j = \overline{1, m}, \quad (9)$$

- ITSE extins:

$$I_{ITSE}^{\alpha_j}(\beta) = \int_0^{\infty} \{te^2(t) + (\gamma^{\alpha_j})^2 [\sigma^{\alpha_j}(t)]^2\} dt, \quad j = \overline{1, m}, \quad (10)$$

- ITAE extins:

$$I_{ITAE}^{\alpha_j}(\beta) = \int_0^{\infty} \{t|e(t)| + (\gamma^{\alpha_j})^2 [\sigma^{\alpha_j}(t)]^2\} dt, \quad j = \overline{1, m}, \quad (11)$$

în care $\gamma^{\alpha_j}, j = \overline{1, m}$, sunt parametri de ponderare. Regimurile dinamice sunt considerate în raport cu modificări de tip treaptă ale intrării de referință și ale intrării de perturbație. Astfel numărul de funcții obiectiv definite în relațiile (8)-(11) se dublează.

Folosind funcțiile obiectiv definite în relațiile (8)-(11) pot fi definite următoarele probleme de optimizare care asigură acordarea optimă a parametrilor reglatoarelor:

$$\beta^* = \arg \min_{\beta \in Do} I_{ISE}^{\alpha_j}(\beta), \quad \beta^* = \arg \min_{\beta \in Do} I_{IAE}^{\alpha_j}(\beta), \quad (12)$$

$$\beta^* = \arg \min_{\beta \in Do} I_{ITSE}^{\alpha_j}(\beta), \quad \beta^* = \arg \min_{\beta \in Do} I_{ITAE}^{\alpha_j}(\beta), \quad j = \overline{1, m},$$

în care β^* este valoarea optimă a parametrului (variabilei din cadrul problemei de optimizare) β și Do este domeniul admisibil al lui β .

În definirea domeniului Do trebuie luată în considerare în primul rând necesitatea asigurării stabilității sistemului de reglare automată. Acesta poate conduce la restricții de tip inegalitate (de tip Hurwitz în cazul sistemelor lineare). Pot fi definite și alte restricții asociate problemelor de optimizare definite în relația (12). De exemplu, acestea se pot referi la intrarea în limitare a elementului de execuție [B20], stabilitatea robustă a sistemului de reglare automată sau robustețea regulatorului [B21].

Regulatorul fuzzy Takagi-Sugeno este un regulator în timp discret, construit în jurul regulatorului fuzzy cu două intrări și o ieșire (TISO-FC) după cum este descris în structura prezentată în fig. 2, în care $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ este incrementul erorii de reglare și $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ este incrementul comenzii. Se presupune că eventualii factori de scalare nelinieri ai variabilelor de intrare și ieșire ai TISO-FC sunt introduși în modelul procesului condus.



Fig. 2. Structura reglatoarelor fuzzy Takagi-Sugeno.

Fuzificarea în TISO-FC este realizată cu ajutorul funcțiilor de apartenență ale variabilelor de intrare prezentate în fig. 3. Pentru defuzificare este folosită metoda mediilor ponderate.

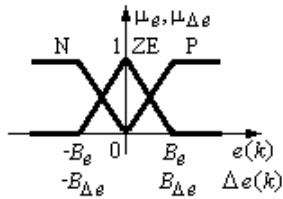


Fig. 3. Funcțiile de apartenență ale variabilelor de intrare.

În modulul de inferență sunt folosiți operatori SUM și PROD asociați cu cele nouă reguli prezentate în Tabelul I, în care:

$$f_1(k) = K_p[\Delta e(k) + \mu e(k)], f_2(k) = \eta f_1(k), \quad (13)$$

Parametrii K_p și μ sunt obținuți printr-o procedură ce conține doi pași. În primul pas se face proiectarea în timp continuu a regulatorului liniar PI cu funcția de tranfer $C(s)$:

$$C(s) = k_c(1 + sT_i) / s = k_c[1 + 1/(sT_i)], k_c = k_c T_i, \quad (14)$$

în care k_c este coeficientul de transfer al regulatorului și T_i este constanta de timp de integrare.

Tabelul I. Tabelul de decizie al TISO-FC

$\Delta e(k)$	$e(k)$		
	N	ZE	P
P	$\Delta u(k) = f_1(k)$	$\Delta u(k) = f_1(k)$	$\Delta u(k) = f_2(k)$
ZE	$\Delta u(k) = f_1(k)$	$\Delta u(k) = f_1(k)$	$\Delta u(k) = f_1(k)$
N	$\Delta u(k) = f_2(k)$	$\Delta u(k) = f_1(k)$	$\Delta u(k) = f_1(k)$

În cel de-al doilea pas este aleasă valoarea perioadei de eșantionare T_s ținând seama de cerințele reglării numerice cvasi-continue și apoi este aplicată metoda lui Tustin pentru discretizarea regulatorului PI liniar în timp continuu. Astfel, ecuația recurentă a regulatorului PI numeric în variantă incrementală devine:

$$\Delta u(k) = K_p[\Delta e(k) + \mu e(k)], \quad (15)$$

iar parametrii specifici acestui regulator numeric obțin expresiile

$$K_p = k_c(T_i - T_s/2), \mu = 2T_s/(2T_i - T_s), \quad (16)$$

Parametrul η , cu valori uzuale $0 < \eta < 1$, este introdus pentru a micșora valoarea suprareglajului sistemului de reglare automată (fuzzy) care este ilustrat prin situațiile în care $e(k)$ și $\Delta e(k)$ sunt de același semn. Tabelul I poate fi folosit, de asemenea, în cazul reguletoarelor fuzzy dedicate sistemelor cu fază neminimă cu poli în semiplanul drept când o asemenea bază de reguli produce micșorarea subreglajului.

Baza completă de reguli prezentată în Tabelul I poate fi redusă la doar două reguli. Pot fi utilizate diverse tehnici pentru a simplifica baza de reguli și a realiza implementarea cu cost redus a reguletoarelor PI-FC [B22], [B23].

Principiul echivalenței modale este aplicat pentru a obține parametrii regulatorului PI-FC din parametrii regulatorului liniar astfel încât cele două reguletoare să asigure aceleași valori ale ieșirii (comenzii) pentru valorile modale ale intrărilor. Rezultă astfel următoarea relație utilă de proiectare:

$$B_{\Delta e} = \mu B_e, \quad (17)$$

Pentru a formula o nouă metodă de proiectare dedicată reguletoarelor fuzzy Takagi-Sugeno este folosită o clasă de procese de ordinul doi cu compenentă integratoare (fig. 4) caracterizată prin funcția de transfer

$$P(s) = k_p / [s(1 + T_s s)], \quad (18)$$

în care k_p este coeficientul de transfer al procesului și T_s este o constantă de timp mică sau suma algebrică a constantelor de timp mici (parazite).

Modelul (18) este privit ca modelul matematic liniarizat al unei glase generice de procese conduse care includ dinamica elementelor de execuție și elementelor de măsură. Astfel de procese sunt utilizate într-o arie largă de servo sisteme cu aplicații industriale [B24]–[B28], iar cei doi parametri din relația (18) sunt variabili. Astfel se justifică analiza sensibilității realizată în continuare și proiectarea sistemelor de reglare automată cu sensibilitate redusă. Vectorul parametrilor procesului condus este α ($m = 2$),

$$\alpha = [\alpha_1 = k_p \quad \alpha_2 = T_s]^T \in R^2, \quad (19)$$

După cum este prezentat în [B29], pentru procesele conduse modelate pe baza relației (18) pot fi acordate reguletoare PI folosind metoda ESO pentru a garanta un compromis bun între valorile indicatorilor de calitate (suprareglaj, timp de reglare, timp de creștere) printr-un singur parametru de proiectare β . Condițiile de acordare a reguletoarelor PI, ce pot fi privite ca o restricție de tip egalitate în problemele de acordare optimală a parametrilor reguletoarelor, sunt

$$k_c = 1/(\beta \sqrt{\beta T_s^2 k_p}), T_i = \beta T_s, \quad (20)$$

Indicatorii de calitate ai sistemului de reglare automată pot fi îmbunătățiți prin introducerea filtrului de referință cu funcția de transfer

$$F(s) = 1/(1 + T_i s), \quad (21)$$

Se ajunge astfel la proiectarea reguletoarelor cu două grade de libertate. Utilizând fig. 4 modelul matematic de stare al procesului condus este

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) + d(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -(1/T_\Sigma)x_2(t) + (k_p/T_\Sigma)u(t), \end{aligned} \quad (22)$$

$$y(t) = x_1(t),$$

în care x_1 și x_2 sunt variabile de stare. Presupunînd că x_3 este ieșirea componentei integrale în structura paralelă a regulatorului PI, modelul de stare al regulatorului este

$$\dot{x}_3(t) = (1/T_i)e(t), \quad (23)$$

$$u(t) = k_c(x_3(t) + e(t)).$$

Pentru a deduce modelele de sensibilitate în raport cu variațiile parametriche ale procesului condus, regulatorul PI liniar trebuie acordat prin aplicarea relației (20) pentru valorile nominale ale parametrilor procesului k_{p0} și $T_{\Sigma 0}$.

Modelul de stare al regulatorului PI devine astfel

$$\dot{x}_3(t) = [(1/\beta T_{\Sigma 0})]e(t), \quad (24)$$

$$u(t) = [1/(\sqrt{\beta}k_{p0}T_{\Sigma 0})](x_3(t) + e(t)).$$

Unificând modelele (22) și (24) rezultă modelul de stare sistemului de reglare automată

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) + d(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -[k_p/(\sqrt{\beta}k_{p0}T_{\Sigma 0}T_\Sigma)]x_1(t) - (1/T_\Sigma)x_2(t) + \\ &\quad + [k_p/(\sqrt{\beta}k_{p0}T_{\Sigma 0}T_\Sigma)]x_3(t) + \\ &\quad + [k_p/(\sqrt{\beta}k_{p0}T_{\Sigma 0}T_\Sigma)]r(t), \\ \dot{x}_3(t) &= -[1/(\beta T_{\Sigma 0})]x_1(t) + [1/(\beta T_{\Sigma 0})]r(t), \\ y(t) &= x_1(t). \end{aligned} \quad (25)$$

$$y(t) = x_1(t).$$

Înlocuind relația (7) în modelul (25) se ajunge la următorul model de sensibilitate în raport cu k_p :

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_1^{k_p}(t) &= \lambda_2^{k_p}(t), \\ \dot{\lambda}_2^{k_p}(t) &= -[1/(\sqrt{\beta}T_{\Sigma 0}^2)]\lambda_1^{k_p}(t) - (1/T_{\Sigma 0})\lambda_2^{k_p}(t) + \\ &\quad + [1/(\sqrt{\beta}T_{\Sigma 0}^2)]\lambda_3^{k_p}(t) - [1/(\sqrt{\beta}k_{p0}T_{\Sigma 0}^2)]x_{10}(t) + \\ &\quad + [1/(\sqrt{\beta}k_{p0}T_{\Sigma 0}^2)]x_{30}(t) + [1/(\sqrt{\beta}k_{p0}T_{\Sigma 0}^2)]r_0(t), \\ \dot{\lambda}_3^{k_p}(t) &= -[1/(\beta T_{\Sigma 0})]\lambda_1^{k_p}(t), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\dot{\lambda}_3^{k_p}(t) = -[1/(\beta T_{\Sigma 0})]\lambda_1^{k_p}(t),$$

$$\sigma^{k_p}(t) = \lambda_1^{k_p}(t),$$

și la modelul de sensibilitate în raport cu T_Σ :

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_1^{T_\Sigma}(t) &= \lambda_2^{T_\Sigma}(t), \\ \dot{\lambda}_2^{T_\Sigma}(t) &= -[1/(\sqrt{\beta}T_{\Sigma 0}^2)]\lambda_1^{T_\Sigma}(t) - (1/T_{\Sigma 0})\lambda_2^{T_\Sigma}(t) + \\ &\quad + [1/(\sqrt{\beta}T_{\Sigma 0}^2)]\lambda_3^{T_\Sigma}(t) + [1/(\sqrt{\beta}T_{\Sigma 0}^3)]x_{10}(t) + \\ &\quad + (1/T_{\Sigma 0}^2)x_{20}(t) - [1/(\sqrt{\beta}T_{\Sigma 0}^3)]x_{30}(t) - \\ &\quad - [1/(\sqrt{\beta}T_{\Sigma 0}^3)]r_0(t), \\ \dot{\lambda}_3^{T_\Sigma}(t) &= -[1/(\beta T_{\Sigma 0})]\lambda_1^{T_\Sigma}(t), \end{aligned} \quad (27)$$

$$\dot{\lambda}_3^{T_\Sigma}(t) = -[1/(\beta T_{\Sigma 0})]\lambda_1^{T_\Sigma}(t),$$

$$\sigma^{T_\Sigma}(t) = \lambda_1^{T_\Sigma}(t).$$

Parametrii regulatorului, care sunt considerați variabile ale problemelor de optimizare ce urmează a fi determinați prin metoda de proiectare propusă aici, sunt grupați în vectorul parametrilor \mathbf{p} ($q = 3$):

$$\mathbf{p} = [\rho_1 = \beta \quad \rho_2 = B_e \quad \rho_3 = \eta]^T \in R^3, \quad (28)$$

iar domeniul admisibil pentru vectorul \mathbf{p} este Do:

$$Do = \{\beta | 1 < \beta < 20\} \times \{B_e | B_e > 0\} \times \{\eta | 0 < \eta < 1\}, \quad (29)$$

Prin sintetizarea tuturor aspectelor prezentate anterior, metoda de proiectare propusă pentru reguletoarele fuzzy Takagi-Sugeno constă în următorii pași:

Pasul I. Este aleasă valoarea perioadei de eșantionare T_s , iar modelele de sensibilitate (26) și (27) sunt deduse și apoi discretizate.

Pasul II. Sunt definiți parametrii de ponderare γ^{α_j} , $j = \overline{1,2}$, din funcțiile obiectiv (8)–(11) pentru a îndeplini performanțele impuse sistemului de reglare fuzzy.

Pasul III. Este aplicat un algoritm de optimizare pentru rezolvarea problemele de optimizare (12) și obținerea vectorului parametrilor optimali de acordare \mathbf{p}^*

$$\mathbf{p}^* = [\rho_1^* = \beta^* \quad \rho_2^* = B_e^* \quad \rho_3^* = \eta^*]^T, \quad (30)$$

Pasul IV. Se aplică relațiile (17) și (30) pentru obținerea celor trei parametri ai regulatorului, B_e^* , $B_{\Delta e}^*$ și η^* .

Algoritmii de optimizare care pot fi folosiți în continuare pentru rezolvarea problemelor de optimizare (12) sunt Particle Swarm Optimization, Simulated Annealing, Gravitational Search Algorithm, etc., variante îmbunătățite ale acestora fiind dezvoltate chiar de către echipa de cercetare. Acești algoritmi au proprietatea ca sunt iterativi, folosesc date experimentale/de simulare, însă din acest punct de vedere sunt relativ ineficienți pentru că necesită un număr foarte mare de experimente/interacțiuni cu procesul condus pentru a oferi o soluție globală (sub-optimală) la problema de optimizare originală, având însă pe de altă parte avantajul/posibilitatea abordării problemelor de optimizare neliniară cu mai multe minime locale. Și în cazul acestor algoritmi, evaluarea funcțiilor obiectiv supuse optimizării se face experimental folosind datele culese de pe proces, similar cu alte tehnici iterative bazate pe informație de gradient precum IFT, ILC, SPSA, studiate de către echipa de cercetare în cadrul proiectului.

C. METODĂ DE ACORDARE OPTIMALĂ A REGULATOARELOR FUZZY DE TIP TAKAGI-SUGENO FOLOSIND TEHNICI DE TIP ITERATIVE FEEDBACK TUNING

Structura sistemului de reglare automată (SRA) linear cu algoritm IFT este prezentată în fig. 4, în care: r – intrarea de referință, d – perturbația, e – eroarea de reglare, u – comanda, \mathbf{p} – vectorul parametrilor acordabili ai regulatorului, $C(\mathbf{p})$ – funcția de transfer a regulatorului linear care va fi înlocuit de regulatorul de tip fuzzy pentru a îmbunătăți performanțele SRA, F – funcția de transfer (f.d.t.) a modelului de referință, P – funcția de transfer a procesului condus, y – ieșire controlată, y_d – ieșirea dorită (a modelului de referință), $\delta y = y - y_d$ – eroarea de urmărire a modelului de referință, vectorul \mathbf{i} care conține specificațiile de performanță impuse sistemului de reglare automată, adică valori dorite pentru, de exemplu suprareglaj, timp de reglare, timp de creștere ș.a.m.d.

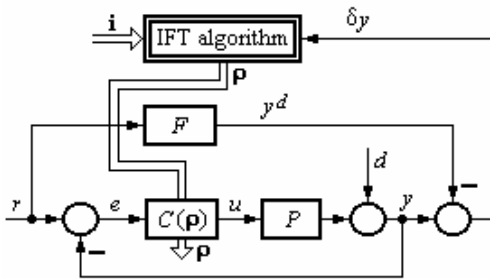


Fig. 4. Structura sistemului de reglare linear cu algoritmul IFT.

O expresie posibilă a funcției obiectiv (FO) $J(\mathbf{p})$ spre minimizare folosind IFT este

$$J(\mathbf{p}) = (0.5 / N) \sum_{t=1}^N [\delta y(t, \mathbf{p})]^2, \quad (31)$$

Unde N este numărul de eșantioane specifice duratei experimentului. Tipic, se urmărește aflarea vectorului parametrilor \mathbf{p}^* care minimizează $J(\mathbf{p})$ și face ca eroarea de urmărire δy să tindă spre zero când $t \rightarrow \infty$. Problema de optimizare (PO) aferentă poate fi descrisă succint astfel:

$$\mathbf{p}^* = \underset{\mathbf{p} \in SD}{\operatorname{arg\,min}} J(\mathbf{p}), \quad (32)$$

cu câteva restricții suplimentare care pot fi impuse, cea mai importantă privind stabilitatea sistemului, cu SD reprezentând domeniul de stabilitate. Modelul de referință este uzual ales ca o f.d.t. de ordinul doi normalizată, cu pulsația naturală și coeficientul de amortizare translatând ușor indicatori de performanță în domeniul timp.

Algoritmul IFT rezolvă PO (32) folosind un algoritm numeric de aproximare stochastica (AS) care necesită smenulul de comandă și ieșirea controlată culese în timpul funcționării SRA. Algoritmul Robbins-Munro de tip AS caută soluția unei ecuații neliniare evaluată prin măsurarea afectată de zgomot, fără a folosi expresia analitică a acesteia. IFT nu este folosit doar în scheme de reglare automată adaptivă cu model etalon (MRAC) dar și în probleme de reglare automată mai generale formulate sub forma unor FO de tip Linear-pătratic Gaussian (LQG) care penalizează traiectoriile stărilor, erorilor de reglare, semnalului de comandă, ieșirii controlate. Astfel MRAC este un caz particular al LQG. Rezultate importante privind aplicarea IFT la procese neliniare sunt tratate în [C1],[C5]. Ipoteza necesară acestei aplicabilități este ca procesul condus să aibe nelinearități netede.

Legea de actualizare a parametrilor regulatorului \mathbf{p}^{i+1} este

$$\mathbf{p}^{i+1} = \mathbf{p}^i - \gamma^i (\mathbf{R}^i)^{-1} \operatorname{est} \left[\frac{\partial J}{\partial \mathbf{p}} (\mathbf{p}^i) \right], \quad \mathbf{R}^i > 0, \det \mathbf{R}^i \neq 0, \quad (33)$$

unde: $i, i \in N$ – indexul iterației, $est[\frac{\partial J}{\partial \mathbf{p}}(\mathbf{p}^i)]$ – estimatul graidentului FO în raport cu vectorul parametrilor de acordare ai regulatorului, γ^i – coeficientul de scalare al pasului, și \mathbf{p}^0 – vectorul de inițializare al parametrilor regulatorului. Secvența $\{\gamma^i\}_{i \in N}$ trebuie aleasă astfel încât să asigure convergența algoritmului de căutare.

Matricea \mathbf{R}^i poate fi o estimată a Hessianului FO sau o aproximare Gauss-Newton a matricii Hessian, sau chiar matricea identitate pentru a reduce complexitatea algoritmului IFT. Alte alegeri pentru estimarea matricii Hessian pot fi cele specifice algoritmului Levenberg-Marquardt (LMA) [C3] sau algoritmului Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno [C1]. Acești algoritmi pot da rezultate foarte bune atunci când raportul semnal-zgomot este mare.

Algoritmul IFT propus și aplicat SRA cu regulator de tip fuzzy înlocuind un regulator linear constă în următorii pași:

- Pasul 0. Se alege vectorul inițial \mathbf{p}^0 al parametrilor regulatorului care să asigure stabilitatea SRA de tip fuzzy.
- Pasul 1. Se efectuează experimentele normal și de gradient specifice IFT în urma cărora sunt culese intrările de comandă ale procesului și ieșirile controlate sub forma perechilor de intrare ieșire (u_1, y_1) și (u_2, y_2) . Primul experiment, cel normal, corepsunde funcționării nominale a SRA. În experimentul de gradient, eroarea de reglare din experimentul normal este setată ca și intrare de referință a SRA. Estimata gradientului FO în raport cu parametrii regulatorului, $est[\frac{\partial \delta y}{\partial \mathbf{p}}(t, \mathbf{p}^i)]$, este

$$est[\frac{\partial \delta y}{\partial \mathbf{p}}(t, \mathbf{p}^i)] = \frac{1}{C(z^{-1}, \mathbf{p}^i)} \cdot \frac{\partial C}{\partial \mathbf{p}}(z^{-1}, \mathbf{p}^i) \cdot y_2(t, \mathbf{p}^i), \quad (34)$$

unde indicele inferior 2 denotă experimentul de gradient.

- Pasul 2. Se calculează eroarea de urmărire a modelului de referință δy , folosind y_d .
- Pasul 3. Se calculează estimata gradientului FO $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{p}}(\mathbf{p}^i)$ și eventual estimata matricii Hessian $\mathbf{R}^i(\mathbf{p}^i)$ a FO J

folosind (34) în

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{p}}(\mathbf{p}^i) = (1/N) \sum_{t=1}^N \{ \delta y(t, \mathbf{p}^i) est[\frac{\partial \delta y}{\partial \mathbf{p}}(t, \mathbf{p}^i)] \}, \quad (35)$$

$$\mathbf{R}^i(\mathbf{p}^i) = (1/N) \sum_{t=1}^N \{ est[\frac{\partial \delta y}{\partial \mathbf{p}}(t, \mathbf{p}^i)] \} \{ est[\frac{\partial \delta y}{\partial \mathbf{p}}(t, \mathbf{p}^i)] \}^T.$$

- Pasul 4. Se alege γ^i și se folosește algoritmul (33) care oferă \mathbf{p}^{i+1} de la iterația următoare care trebuie să asigure stabilitatea SRA.

Pasul 0 este rulat o singură dată la început în timp ce ceilalți pași sunt apelați la fiecare iterație a algoritmului de căutare bazat pe gradient, până valoarea FO scade sub un anumit prag sau până ce aceasta descrește suficient. Se consideră că algoritmul se oprește și că SRA a atins specificațiile impuse de performanță.

D. BIBLIOGRAFIE

D.1. Bibliografie aferentă secțiunii B

- [B1] Rosenwasser E., Yusupov R., (2000) Sensitivity of automatic control systems, CRC Press, Boca Raton, FL.
- [B2] Yaniv O., (2004) Design of low-order controllers satisfying sensitivity constraints for unstructured uncertain plants, Int J Robust Nonlinear Control 14: 1359–1370.
- [B3] Oded T., Arkady L., (2004) Design of low order controllers satisfying sensitivity constraints for unstructured uncertain plants, Proceedings of 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Herzlia, Israel, pp 33–36.
- [B4] Shirao J., Imai J., Konishi M., (2006) Structure design with sensitivity control performance limitation for electromechanical systems, Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference SICE-ICCAS 2006, Busan, Korea, pp 2362–2367.
- [B5] Precup R.-E., Preitl S., Korondi P., (2007) Fuzzy controllers with maximum sensitivity for servosystems, IEEE Trans Ind Electron 54: 1298–1310.
- [B6] Marchetti G., Barolo M., Jovanovic L., Zisser H., Seborg D.E., (2008) An improved PID switching control strategy for type 1 diabetes, IEEE Trans Biomed Eng 55: 857–865.
- [B7] Wang Y.G., Xu X.M., (2009) PID tuning for unstable processes with sensitivity specification, Proceedings of Chinese Control and Decision Conference CCDC '09, Guilin, China, pp 3460–3464.
- [B8] Precup R.-E., Preitl S., (2004) Optimisation criteria in development of fuzzy controllers with dynamics, Eng Appl Artif Intell 17: 661–674.
- [B9] Köppen M., (2006) Light-weight evolutionary computation for complex image-processing applications, Proceedings of 6th International Conference on Hybrid Intelligent Systems HIS '06, Auckland, New Zealand, pp 3–3.
- [B10] Zhou H., Schaefer G., Shi C., (2008) A mean shift based fuzzy c-means algorithms for image segmentation, Proceedings of 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society EMBC'08, Vancouver, BC, Canada, pp 3091–3094.

- [B11] Schaefer G., Nakashima T., Zavisek M., (2008) Analysis of breast thermograms based on statistical image features and hybrid fuzzy classification, Bebis G, Boyle R, Parvin B et al (eds) *Advances in visual computing*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Lecture Notes in Computer Science, vol 5358, pp 753–762.
- [B12] Abraham A., Corchado E., Corchado J.M., (2009) Hybrid learning machines, *Neurocomputing* 72: 2729–2730.
- [B13] Precup R.-E., Preitl S., (2005) On the stability and sensitivity analysis of fuzzy control systems for servo-systems, Nedjah N, de Macedo Mourelle L (eds) *Fuzzy systems engineering, theory and practice*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp 131–161.
- [B14] Ekel P.Y., Menezes M., Schuffner Neto F.H., (2007) Decision making in a fuzzy environment and its application to multicriteria power engineering problems, *Nonlinear Analysis: Hybrid Syst* 1: 527–536.
- [B15] Xu J., Wu H., Wang Y., (2008) Unpower aircraft augmented state feedback tracking guaranteed cost control, *J Syst Eng Electron* 19: 125–130.
- [B16] Campos F.M.M.O., Calado J.M.F., (2009) Approaches to human arm movement control - A review, *Annu Rev Control* 33: 69–77.
- [B17] Chen J., Kong C.K., (2009) Performance assessment for iterative learning control of batch unit, *J Process Control* 19: 1043–1053.

D.2. Bibliografie aferentă secțiunii C

- [C1] Hamamoto, K., Fukuda, T., & Sugie, T. (2003). Iterative feedback tuning of controllers for a two-mass-spring system with friction. *Control Engineering Practice*, 11(9), 1061–1068.
- [C2] Hjalmarsson, H., Gevers, M., Gunnarsson, S., & Lequin, O. (1998). Iterative feedback tuning: theory and applications. *IEEE Control Systems Magazine*, 18(4), 26–41.
- [C3] Huusom, J. K., Poulsen, N. K., & Jørgensen, S. B. (2009a). Data driven tuning of state space control loops with unknown state information and model uncertainty. *Computer Aided Chemical Engineering*, 26, 441–446.
- [C4] Huusom, J. K., Poulsen, N. K., & Jørgensen, S. B. (2009b). Improving convergence of iterative feedback tuning, *Journal of Process Control*, 19(4), 570–578.
- [C5] Sjöberg, J., De Bruyne, F., Agarwal, M., Anderson, B. D. O., Gevers, M., Kraus, F. J., & Linard, N. (2003). Iterative controller optimization for nonlinear systems. *Control Engineering Practice*, 11(9), 1079–1086.

D.3. BIBLIOGRAFIE PROPRIE (în 2016)

- lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact:

- [R1] M.-B. Rădac and R.-E. Precup (corresponding author), Three-level hierarchical model-free learning approach to trajectory tracking control, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* (Elsevier Science), vol. 55, pp. 103-118, 2016, impact factor (IF) = 2.368, IF according to 2015 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2016 = 2.368, relative influence score = 2.116.
- [R2] R.-C. Roman, M.-B. Rădac and R.-E. Precup (corresponding author), Multi-input-multi-output system experimental validation of model-free control and virtual reference feedback tuning techniques, *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 12, pp. 1395-1403, 2016, impact factor (IF) = 1.957, IF according to 2015 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2016 = 1.957, relative influence score = 1.856.
- [R3] M.-B. Rădac and R.-E. Precup (corresponding author), Model-free constrained data-driven iterative reference input tuning algorithm with experimental validation, *International Journal of General Systems* (Taylor & Francis), vol. 45, no. 4, pp. 455-476, 2016, impact factor (IF) = 1.677, IF according to 2015 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2016 = 1.677, relative influence score = 0.605.
- [R4] R.-C. Roman, M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Data-driven Model-Free Adaptive Control Tuned by Virtual Reference Feedback Tuning, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 13, no. 1, pp. 83-96, 2016, impact factor (IF) = 0.544, IF according to 2015 Journal Citation Reports (JCR) released by Thomson Reuters in 2016 = 0.544, relative influence score = 0.313.

- capitole de carte:

- [R5] R.-C. Roman, M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Virtual Reference Feedback Tuning of MIMO Data-Driven Model-Free Adaptive Control Algorithms, in: *Technological Innovation for Cyber-Physical Systems*, L. M. Camarinha-Matos, A. J. Falcao, N. Vafaei and S. Najdi, Eds., IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 470 (Springer International Publishing), pp. 253-260, 2016, indexed in Scopus, DBLP.
- [P1] R.-E. Precup, E.-I. Voişan, E. M. Petriu, M.-B. Rădac and L.-O. Fedorovici, Gravitational Search Algorithm-Based Evolving Fuzzy Models of a Nonlinear Process, in: *Informatics in Control, Automation and Robotics*, J. Filipe, K. Madani, O. Gusikhin and J. Sasiadek, Eds., Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 383 (Springer International Publishing), pp. 51-62, 2016, indexed in Scopus.

- lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale:

- [R6] M.-B. Rădac, R.-E. Precup and R.-C. Roman, Data-Driven Virtual Reference Feedback Tuning and Reinforcement Q-learning for Model-Free Position Control of an Aerodynamic System, *Proceedings of 24th Mediterranean Conference on Control and Automation MED'2016*, Athens, Greece, pp. 1126-1132, 2016, indexed in IEEE Xplore, INSPEC.
- [P2] R.-E. Precup, T.-A. Teban, T. E. Alves de Oliveira and E. M. Petriu, Evolving Fuzzy Models for Myoelectric-based Control of a Prosthetic Hand, *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems FUZZ-IEEE 2016*, Vancouver, Canada, pp. 72-77, 2016, to be indexed in IEEE Xplore, INSPEC.

- [T1] T.-A. Teban, R.-E. Precup, E.-I. Voişan, T. E. Alves de Oliveira and E. M. Petriu, Recurrent Dynamic Neural Network Model for Myoelectric-based Control of a Prosthetic Hand, Proceedings of 10th Annual IEEE International Systems Conference SysCon 2016, Orlando, FL, USA, pp. 1-6, 2016, indexed in IEEE Xplore, INSPEC, Scopus.
- [B1] C.-A. Bojan-Dragoş, R.-E. Precup, S. Preitl, A.-I. Szedlak-Stînean and E. M. Petriu, Particle Swarm Optimization of Fuzzy Models for Electromagnetic Actuated Clutch Systems, Proceedings of 18th Mediterranean Electromechanical Conference MELECON 2016, Limassol, Cyprus, pp. 1-6, 2016, indexed in IEEE Xplore, INSPEC, Scopus.
- [P3] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, M.-B. Rădac and E.-I. Voişan, Experiment-Based Comparison of Nature-Inspired Algorithms for Optimal Tuning of PI-Fuzzy Controlled Nonlinear DC Servo Systems, Proceedings of 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2016, Capri, Italy, pp. 1261-1266, 2016, indexed in IEEE Xplore, INSPEC.
- [H1] E.-L. Hedrea, M.-B. Rădac and R.-E. Precup, Virtual Reference Feedback Tuning for Position Control of a Twin Rotor Aerodynamic System, Proceedings of 11th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2016, Timisoara, Romania, pp. 57-62, 2016, indexed in IEEE Xplore, INSPEC, Scopus.
- [P4] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, A.-I. Szedlak-Stînean and C.-A. Bojan-Dragoş, Grey Wolf Optimizer-Based Approach to the Tuning of PI-Fuzzy Controllers with a Reduced Process Parametric Sensitivity, Proceedings of 4th IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Sciences ICONS 2016, Reims, France, 2016, IFAC-PapersOnLine, vol. 48, no. 5, pp. 55-60, 2016, indexed in Scopus.

Director proiect,
Prof.dr.ing. Radu-Emil Precup