

## Raport științific

*privind implementarea proiectului în perioada octombrie 2011 – octombrie 2013*

### A. 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 automata utilizand acordarea parametrilor bazata 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, as.dr.ing. Daniel Iercan, as.dr.ing. Mircea-Bogdan Rădac, as.dr.ing. Claudia-Adina Dragoș, drd.ing. Alexandra-Iulia Stînean, drd.ing. Lucian-Ovidiu Fedorovici.

**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 reglatoarelor. 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-Iulia Stînean a prezentat lucrarea [S1] (indexată INSPEC, IEEE Xplore) în cadrul 12<sup>th</sup> 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 reglatoarelor. **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 reglatoarelor. 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 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 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 regulatoare 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 (Zentralblatt 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 pe toată perioada de execuție a proiectului până în prezent (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 (Zentralblatt MATH).**
- **19 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, Scopus).**
- **5 capitole de carte publicate în editura Springer-Verlag.**
- **1** lucrare,  
<http://wsc16.cs.lboro.ac.uk/conference/sites/default/files/Paper%206%20WSC%2016.pdf>,  
premiată cu *Best Paper Award* la 16<sup>th</sup> Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC16 (Loughborough University, UK, 2011), a se vedea  
<http://wsc16.cs.lboro.ac.uk/conference/?q=node/40>.

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://wsc16.cs.lboro.ac.uk/conference/sites/default/files/Paper%206%20WSC%2016.pdf> [P1], premiată cu **Best Paper Award** la 16<sup>th</sup> Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC16 (Loughborough University, UK, 2011), a se vedea <http://wsc16.cs.lboro.ac.uk/conference/?q=node/40>.

#### *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 (Zentralblatt 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.

#### **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. La unele relații va fi păstrată numerotarea din raportul de cercetare.

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.

## **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  $\mathbf{p}$ ,  $\gamma_k$  – coeficientul de scalare a pasului,  $\Delta_k$  – 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,  $\lambda$  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  $\Delta_k$  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).

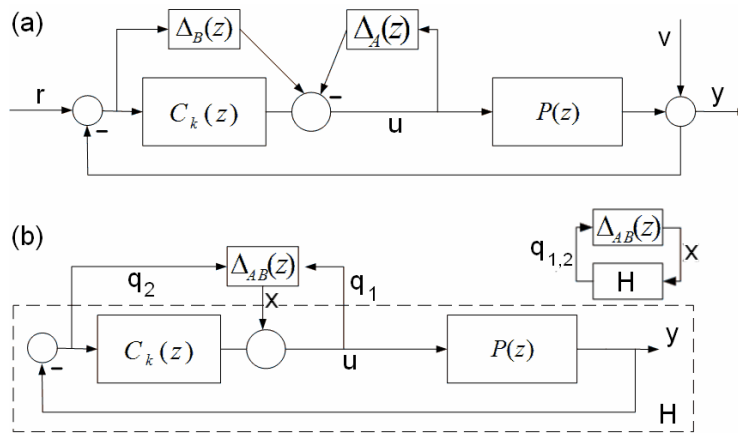


Fig. 1. Regulatorul următor construit ca incertitudine pentru cel curent (a) și transformarea sub formă standard LFT superioară (b).

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  $\alpha$ . 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 reguletoarelor 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 capitolului G.

Fie SRA descris prin modelul monovariabil liniar invariant în timp:

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

(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 traiectoriei de referință, pe un orizont de timp finit  $N$ :

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

în care  $e'(\mathbf{p}, k) = y(\mathbf{p}, r, k) - y^d(k)$  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  $r_n$ :

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

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  $\sigma$  – intrarea de referință de tip treaptă și  $e$  – eroarea de reglare.

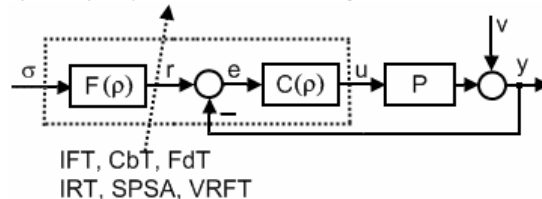


Fig. 1. Sistem de reglare automată interpretat ca structură 2-DOF.

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

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

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  $\gamma_j$  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 sistem 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 traiectoriei 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 traiectoriei 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.

Combi-nația 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 exprimat 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  $rev(\mathbf{E}_j)$ :

$$rev(\mathbf{E}_j) = rev([e_j^t(0) \ \dots \ e_j^t(N-n-1)]^T) = [e_j^t(N-n-1) \ \dots \ e_j^t(0)]^T. \quad (10)$$

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 acet 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,  $\mathbf{q} = 2\mathbf{M}^T \mathbf{T}^T$  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 patricică 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, se poate folosi 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  $\boldsymbol{\varepsilon}_H^i = \left[ \frac{1}{(\tilde{u}_1 - \tilde{\mathbf{s}}_1^T \mathbf{R})^2} \quad \dots \quad \frac{1}{(\tilde{u}_{N-n} - \tilde{\mathbf{s}}_{N-n}^T \mathbf{R})^2} \right]^T$ ,  $i \in \{1,2\}$ , 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  $\kappa$  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  $\gamma_0$  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  $\kappa$  curent, algoritmul este terminat. Altfel se actualizează  $\kappa^{j_k+1} = \kappa^{j_k} / \mu$ ,  $j_k = j_k + 1$ , 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 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:

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

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 stohastică

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

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

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

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

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  $\rho_h$ ,  $h = 1 \dots n_p$ , 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

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

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

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

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

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,  $\rho$ , și una cu cel de-al  $h$ -lea parametru al regulatorului perturbat cu cantitatea  $\mu_h \Delta \rho_h$ . Scalarii  $\mu_h$  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

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

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

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  $\rho_h$ ,  $h = 1 \dots n_p$ , se poate estima astfel:

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

și poate fi obținut experimental cu restricțiile evaluate pentru valorile curente ale parametrilor regulatorului. Mai mult decât atât, putem folosi abordarea cu rețele 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

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

## G. BIBLIOGRAFIE

### G.1. Bibliografie aferentă capitolelor B și C

- [D1] H. Kwakernaak "Robust control and  $H_\infty$  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. 33<sup>rd</sup> 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. 20<sup>th</sup> 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. 33<sup>rd</sup> 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. Markovskiy 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. 20<sup>th</sup> 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. 17<sup>th</sup> 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. Paszyczynski, 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. Teshnehlab, 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 12<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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 38<sup>th</sup> 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 9<sup>th</sup> 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 7<sup>th</sup> 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 7<sup>th</sup> 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 16<sup>th</sup> 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. Dragoş 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 2<sup>nd</sup> 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 1<sup>st</sup> 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. Dragoş 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. Dragoş, 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. Dragoş, St. Preitl and A.-I. Stînean, Data-Driven Performance Improvement of Control Systems for Three-Tank Systems, Proceedings of 2013 6<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 9<sup>th</sup> 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 9<sup>th</sup> International Conference on Computational Cybernetics ICC3 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 8<sup>th</sup> 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 2<sup>nd</sup> 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.

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