

## **Raport stiintific**

*privind implementarea proiectului in perioada ianuarie – decembrie 2012*

### **A. SINTEZĂ GENERALĂ ASUPRA PROIECTULUI**

Echipele 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, 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:

- (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 B sunt prezentate date sintetice aferente acestei analize, însoțite de bibliografia aferentă prezentată în capitolul D.
  - 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 C.
  - 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 E, se referă la:
  - 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În perioada de implementare au fost publicate opt lucrări, [H1], [P1] - [P7], în reviste cotate ISI cu factor de impact între 2.990 și 0.385.
  - 2.2. Participarea și prezentarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. În perioada de implementare au fost publicate 14 lucrări, [C1], [D1], [D2], [F1], [P8] - [P11], [R1], [R2], [R3], [S1], [S2], [S3], în volumele unor conferințe indexate INSPEC sau DBLP, două lucrări, [P12], [P13], în volumele unor conferințe IFAC și trei capitole de carte, [D3], [F2], [P14], în volume din editurile Springer-Verlag și/sau Atlantis Press.

**Principalele rezultate** obținute în cadrul proiectului sunt:

- Raport de cercetare.
- 24 lucrări publicate: opt lucrări, [H1], [P1] - [P7], în reviste cotate ISI cu factor de impact, 14 lucrări, [C1], [D1], [D2], [F1], [P8] - [P11], [R1], [R2], [R3], [S1], [S2], [S3], în volumele unor conferințe indexate INSPEC sau DBLP, două lucrări, [P12], [P13], în volumele unor conferințe IFAC.
- Trei capitole de carte, [D3], [F2], [P14], publicate în volume din editurile Springer-Verlag și/sau Atlantis Press.
- Două capitole care vor fi incluse în teza de doctorat și în raportul de cercetare cu rezultate intermediare ale cercetării (de susținut în septembrie 2013) de cei doi doctoranzi din echipa de cercetare, drd.ing. Alexandra-Iulia Stînean și drd.ing. Lucian-Ovidiu Fedorovici.

**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.

## B. 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.

## C. 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 E.

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.

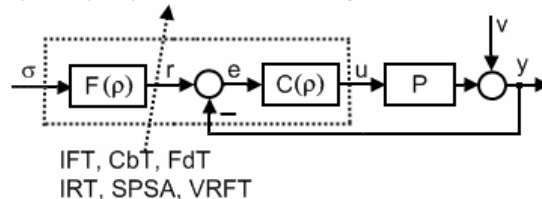


Fig. 1. Sistem de reglare automată interpretat ca structură 2-DOF.

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

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

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:

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

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

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

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

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

Acest experiment 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, într-o rezolvare 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 ale 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 în 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.

#### D. BIBLIOGRAFIE

- [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.

#### **E. BIBLIOGRAFIE PROPRIE**

- [C1] Cerveneak, B.-S., Rădac, M.-B., Precup, R.-E., Stînean, A.-I., Petriu, E. M., Preitl, St. and Dragoş, C.-A. (2012): Novel Iterative Formulation of Correlation-Based Tuning. Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT 2012, Athens, Greece, pp. 898-903, indexată INSPEC.
- [D1] Dragoş, C.-A., Preitl, St., Precup, R.-E., Petriu, E. M. and Stînean, A.-I. (2012): 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, indexată INSPEC.
- [D2] David, R.-C., Precup, R.-E., Petriu, E. M., Rădac, M.-B., Purcaru, C., Dragoş, C.-A. and Preitl, St. (2012): 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, indexată DBLP.
- [D3] David, R.-C., Precup, R.-E., Preitl, St., Tar, J. K. and Fodor, J. (2012): Three Evolutionary Optimization Algorithms in PI Controller Tuning. In: Applied Computational Intelligence in Engineering and Information Technology, Eds. Precup, R.-E., Kovács, Sz., Preitl, St. and Petriu, E. M., Topics in Intelligent Engineering and Informatics, vol. 1 (Springer-Verlag), pp. 95-106.
- [F1] Fedorovici, L.-O., Precup, R.-E., Drăgan, F., David, R.-C. and Purcaru, C. (2012): 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, Timișoara, pp. 125-130, indexată INSPEC.
- [F2] Fedorovici, L.-O., Precup, R.-E., David, R.-C. and Drăgan, F. (2012): 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.
- [H1] Haidegger, T., Kovács, L., Precup, R.-E., Benyó, B., Benyó, Z. and Preitl, St. (2012): Simulation and control for telerobots in space medicine. *Acta Astronautica* (Elsevier Science), vol. 181, no. 1, pp. 390-402, *ISI Science Citation Index (SCI) impact factor = 0.614*.
- [P1] Precup, R.-E., Tomescu, M. L., Rădac, M.-B., Petriu, E. M., Preitl, St. and Dragoş, C.-A. (2012): Iterative performance improvement of fuzzy control systems for three tank systems. *Expert Systems with Applications* (Elsevier Science), vol. 39, no. 9, pp. 8288-8299, *ISI SCI impact factor = 2.203*.
- [P2] Pozna, Cl., Minculete, N., Precup, R.-E., Kóczy, L. T. and Ballagi, Á. (2012): Signatures: Definitions, operators and applications to fuzzy modeling. *Fuzzy Sets and Systems* (Elsevier Science), vol. 201, pp. 86-104, *ISI SCI impact factor = 1.759*.
- [P3] Precup, R.-E., David, R.-C., Petriu, E. M., Preitl, St. and Rădac, M.-B. (2012): Novel adaptive gravitational search algorithm for fuzzy controlled servo systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 4, pp. 791-800, *ISI SCI impact factor = 2.990*.
- [P4] Precup, R.-E., Dragoş, C.-A., Preitl, St., Rădac, M.-B. and Petriu, E. M. (2012): Novel tensor product models for automatic transmission system control. *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 488-498, *ISI SCI impact factor = 0.923*.
- [P5] Precup, R.-E., Haidegger, T., Preitl, St., Benyó, B., Paul, A. S. and Kovács, L. (2012): 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, *ISI SCI impact factor = 0.551*.
- [P6] Pozna, Cl. and Precup, R.-E. (2012): Aspects concerning the observation process modelling in the framework of cognition processes. *Acta Polytechnica Hungarica* (Óbuda University), vol. 9, no. 1, pp. 203-223, *ISI SCI impact factor = 0.385*.
- [P7] Precup, R.-E., Tomescu, M.-L., Petriu, E. M., Preitl, St. and Dragoş, C.-A. (2012): 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, *ISI SCI impact factor = 0.385*.
- [P8] Precup, R.-E., Rădac, M.-B., Filip, H.-I., Preitl, St., Dragoş, C.-A. and Petriu, E. M. (2012): 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, indexată INSPEC.

- [P9] Preitl, St., Precup, R.-E., Stînean, A.-I., Dragoş, C.-A. and Rădac, M.-B. (2012): 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, indexată INSPEC.
- [P10] Precup, R.-E., Preitl, St., Stînean, A.-I., Dragoş, C.-A. and Rădac, M.-B. (2012): 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, Timișoara, pp. 23-28, indexată INSPEC.
- [P11] Purcaru, C., Iercan, D., Precup, R.-E., Enache, S., Dohangie, B. and Fedorovici, L.-O. (2012): 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., indexată INSPEC.
- [P12] Preitl, St., Stînean, A.-I., Precup, R.-E., Preitl, Zs., Petriu, E. M., Dragoş, C.-A. and Rădac, M.-B. (2012): Controller Design Methods for Driving Systems Based on Extensions of Symmetrical Optimum Method with DC and BLDC Motor Applications. Preprints of IFAC Conference on Advances in PID Control PID'12, Brescia, Italy, paper index WePS.6 (0085), 6 pp.
- [P13] Precup, R.-E., David, R.-C., Petriu, E. M., Preitl, S. and Rădac, M.-B. (2012): 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, Eds. Schilling, K. and Leutert, E., pp. 115-120.
- [P14] Preitl, St., Stînean, A.-I., Precup, R.-E., Dragoş, C.-A. and Rădac, M.-B. (2012): 2-DOF and Fuzzy Control Extensions of Symmetrical Optimum Design Method: Applications and Perspectives. In: Applied Computational Intelligence in Engineering and Information Technology, Eds. Precup, R.-E., Kovács, Sz., Preitl, St. and Petriu, E. M., Topics in Intelligent Engineering and Informatics, vol. 1 (Springer-Verlag), pp. 19-37.
- [R1] Rădac, M.-B., Precup, R.-E., Petriu, E. M., Cerveneak, B.-S., Dragoş, C.-A. and Preitl, St. (2012): 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. 2489-2494, indexată INSPEC.
- [R2] Rădac, M.-B., Precup, R.-E., Petriu, E. M., Preitl, St. and Dragoş, C.-A. (2012): 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, indexată INSPEC.
- [R3] Rădac, M.-B., Bigher, B.-A., Precup, R.-E., Petriu, E. M., Dragoş, C.-A., Preitl, St. and Stînean, A.-I. (2012): Data-based Tuning of PI Controllers for Vertical Three-Tank Systems. Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2012, Rome, Italy, vol. 1, pp. 31-39, indexată DBLP.
- [S1] Stînean, A.-I., Preitl, St., Precup, R.-E., Petriu, E. M., Dragoş, C.-A. and Rădac, M.-B. (2012): 2-DOF PI(D) Takagi-Sugeno and Sliding Mode Controllers for BLDC Drives. Proceedings of 15<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia, pp. DS2a.7-1-DS2a.7-6, indexată INSPEC.
- [S2] Stînean, A.-I., Preitl, St., Precup, R.-E., Petriu, E.-M., Dragoş, C.-A. and Rădac, M.-B. (2012): 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, indexată INSPEC.
- [S3] Stînean, A.-I., Preitl, St., Precup, R.-E., Dragoş, C.-A. and Rădac, M.-B. (2012): Hybrid Fuzzy Control Solutions for Brushless DC Drives with Variable Moment of Inertia. Proceedings of IEEE 10<sup>th</sup> Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics SISY 2012, Subotica, Serbia, pp. 317-322, indexată INSPEC.

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