

Raport științific

privind implementarea proiectului în perioada ianuarie – decembrie 2015

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, s.l.dr.ing. Daniel Iercan, s.l.dr.ing. Mircea-Bogdan Rădac, s.l.dr.ing. Claudia-Adina Dragoș, as.dr.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 sub forma următoarelor obiective și **activități**:

- (1) Introducerea tehnicilor de acordare optimală a reguletoarelor în structuri neconvenționale de reglare automată. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
 - 1.1. Utilizarea tehnicilor iterative și experimentale în acordarea optimală a unor structuri de reglare automată cu reguletoare fuzzy de tip Mamdani și de tip Takagi-Sugeno. Sunt prezentate detalii în capitolul D și rezultatele aferente sunt prezentate în subcapitolul E.4.
 - 1.2. Implementarea și validarea tehnicilor propuse pe echipamentele de laborator. Noile tehnici au fost validate prin simulări și experimente efectuate pe un sistem aerodinamic cu două rotoare din laboratorul în care își desfășoară activitatea echipa de cercetare.
- (2) Exploatarea și diseminarea rezultatelor. **Activitățile** desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv, cu rezultatele prezentate în subcapitolul E.4, se referă la:
 - 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În 2015 au fost publicate 7 lucrări, [R1] - [R3], [P1] - [P4], în reviste cotate ISI cu factor de impact între 4.291 și 0.649, cu scor relativ de influență între 2.741 și 0.
 - 2.2. Participarea și publicarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. În 2015 au fost publicate 3 lucrări științifice [R4]–[R5], [P5] - [P6], în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore), 2 capitole de carte, [P12], [D1], în editura Springer-Verlag.

Principalele rezultate obținute în 2015 sunt:

- 7 lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact, factor de impact cumulat ISI Science Citation Index (SCI) calculat conform Thomson Reuters 2014 Journal Citation Reports = **12.115**, scor relativ de influență cumulat = **6.47**.
- 3 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în baze de date internaționale (INSPEC, IEEE Xplore, Scopus).

Remarci:

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

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

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

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

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

În raport cu stadiul actual al cercetărilor din domeniu, a fost 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. În cadrul acestui algoritm, restricțiile de tip inegalitate definite în raport cu limitarea comenzii și în raport cu limitarea derivatei comenzii din interiorul SRA sunt exprimate și înglobate în așa numita funcție de penalizare 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.

Soluția de tratare a restricțiilor atât pentru optimizarea semnalului de referință cât și pentru optimizarea parametrilor reguletoarelor a fost diseminată în lucrările [R1], [R2], [R3] din subcapitolul E.4.

B. ANALIZA STADIULUI ACTUAL PRIVIND DEZVOLTAREA STRUCTURILOR DE REGLARE SOLICITATE DE CONDUCEREA SERVO SISTEMELOR DIN CADRUL SISTEMELOR ÎNCORPORATE

Dezvoltarea sistemelor de reglare fuzzy (fuzzy control systems, FCSs) este realizată de regulă prin mijloace euristice, care include experiența unor experți umani, dar dezavantajul este reprezentat de absența unor metode de dezvoltare cu aplicabilitate generală. O problemă majoră care apare din acest mod de dezvoltare a reguletoarelor fuzzy (fuzzy controllers, FCs) este reprezentată de analiza unor proprietăți ale CS care include stabilitatea, controlabilitatea, sensibilitatea parametrică sau robustețea [B1-B3]. De aici rezultă necesitatea unor metode de dezvoltare dedicate unor reguletoare fuzzy relative simple. O alternativă serioasă este reprezentată mai întâi de dezvoltarea unor reguletoare convenționale care să stabilizeze parțial CP, apoi de dezvoltare a unor reguletoare PI.

IFT [B7-B19] este o abordare bazată pe gradient și pe datele intrare-ieșire achiziționate din sistemul închis. Indicatorii de calitate ai CS sunt specificați prin definirea unor funcții obiectiv (cost functions, c.f.s). Minimizarea unor astfel de funcții necesită de regulă metode iterative bazate pe gradient, însă c.f. pot fi funcții relativ complicate de proces sau modul de variație a perturbațiilor. Trăsătura esențială a IFT este că datele experimentale intrare-ieșire din sistemul închis sunt folosite în calculul estimatei gradientului c.f. La fiecare iterație sunt efectuate câteva experimente iar parametrii actualizați ai reguletoarelor sunt obținuți pe baza datelor de intrare-ieșire achiziționate din FCS.

Transferul rezultatelor din cazul liniar în cel fuzzy, cu rezultatul reprezentat de reguletoarele fuzzy-PI (PI-fuzzy controllers, PI-FCs) este efectuat acceptând echivalența acceptată pe scară largă în anumite condiții între FCS și

CS liniare [B4]. Din acest punct de vedere, scopul combinării tehnicilor IFT și a reguletoarelor de tip fuzzy este de a propune soluții noi low cost care să contribuie la îmbunătățirea performanțelor FCS. Raportul va fi concentrat în cele ce urmează pe dezvoltarea reguletoarelor fuzzy de tip Mamdani. În cadrul grantului au fost tratate însă și reguletoare fuzzy de tip Takagi-Sugeno cu stabilitate garantată [B5],[B6].

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

În anii 2013 și 2014 au fost studiate diverse probleme legate atât de îmbunătățirea tehnicilor iterative cât și de combinarea acestor tehnici cu reguletoare 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 reguletoarelor fuzzy [P1] și altele cu rezultate diseminate în 2013.

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

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

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

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

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

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

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

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

Inovația principală a IFT [1], este aceea că informațiile de gradient pot fi obținute din experimente speciale realizate pe bucla de reglare fără a folosi în mod explicit un model al procesului condus. În același timp însă sunt necesare regimuri de experimentare diferite de regimul nominal. Aceste experimente generează gradientii mărimilor y și u în raport cu parametrii regulatorului, adică $\partial y / \partial \mathbf{p}$ și $\partial u / \partial \mathbf{p}$, care apoi sunt folosite pentru a reconstitui gradientul funcției obiectiv și eventual matricea \mathbf{R}_j . Deși în tehnica IFT originală este invocată ipoteza de linearitate,

aplicațiile dovedesc că tehnica funcționează și în cazul proceselor neliniare. Gradientul funcției obiectiv poate fi estimat conform [1],[2] (subsecțiunea de referințe E.3), nu prin injectarea unor mărimi în bucla de reglare, nici prin aproximarea derivatelor cu diferențe finite prin modificarea parametrilor regulatorului, ci prin perturbarea traiectoriei de referință nominală folosind semnale de amplitudine mică. Această abordare permite extinderea tehnicii IFT la SRA neliniare.

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_h} = \frac{\bar{y}(k, r_n + \mu_h \Delta r_h) - \bar{y}(k, r_n)}{\mu_h \Delta \rho_h}, \quad (6)$$

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

în care se consideră implicit $\Delta \rho_h = 1$ și fiecare numărător din relația (6) poate fi obținut din două simulări: una cu parametrii iterației curente a IFT, \mathbf{p} , și una cu cel de-al h -lea parametru al regulatorului perturbat cu cantitatea $\mu_h \Delta \rho_h$. Scalarii μ_h se aleg automat astfel încât să asigure doar perturbații de mică amplitudine în jurul traiectoriei nominale a referinței $\{r_n(k)\}$. Variabilele \bar{y} și \bar{u} se obțin filtrând neliniar referințele nominale și cele perturbate prin bucla de reglare neliniară formată din conexiunea de tip feedback dintre proces și regulator, ambele neliniare.

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

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p} \in D_s} J(\mathbf{p}), \quad J(\mathbf{p}) = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [r(k) - y(k, \mathbf{p})]^2, \quad (7)$$

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

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

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p} \in D_s} \tilde{J}(\mathbf{p}), \quad \tilde{J}(\mathbf{p}) = J(\mathbf{p}) + \kappa \phi(\mathbf{p}), \quad (8)$$

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

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

$$\frac{\partial \tilde{J}}{\partial \rho_h} = -\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_h} + \kappa \left(\sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_h} \cdot \frac{1}{u_{\max}(k) - u(k, \mathbf{p})} - \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}(k)}{\partial \rho_h} \cdot \frac{1}{u(k, \mathbf{p}) - u_{\min}(k)} \right), \quad (9)$$

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 neglijând derivatele de ordin doi. Elementul (l, m) al matricii \mathbf{R}_j de dimensiune $n_p \times n_p$ este exprimată sub forma

$$\frac{\partial^2 \tilde{J}}{\partial \rho_m \partial \rho_l} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \rho_l} + \kappa \left(\sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \rho_l} \cdot \frac{1}{(u_{\max}(k) - u(k, \mathbf{p}))^2} + \sum_{k=1}^N \frac{\partial \hat{u}}{\partial \rho_m} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \rho_l} \cdot \frac{1}{(u(k, \mathbf{p}) - u_{\min}(k))^2} \right). \quad (10)$$

Cea mai directă aplicare a tehnicii de acordare automată descrisă mai sus este cea în care regulatorul este unul de tip liniar și procesul este de tip neliniar. Regulatorul liniar rezultat în urma acordării iterative poate fi transformat apoi într-un regulator de tip fuzzy pentru îmbunătățirea performanțelor de reglare, conform metodei descrise în secțiunea imediat următoare.

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

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

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

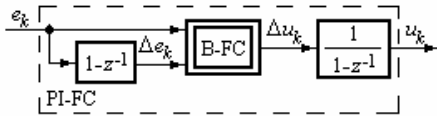


Fig. 4. Structura PI-FC.

Tabelul 1 Tabel de decizie al blocului B-FC

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

E. BIBLIOGRAFIE

E.1. Bibliografie aferentă capitolului A

- [1] M. Ikeda, Y. Fujisaki, and N. Hayashi, "A model-less algorithm for tracking control based on input-output data," *Nonlinear Anal. Theory Methods Appl.*, vol. 47, pp. 1953–1960, Aug. 2001.
- [2] I. Markovsky and P. Rapisarda, "Data-driven simulation and control," *Int. J. Control*, vol. 81, pp. 1946–1959, Dec. 2008.
- [3] M. Helle and H. Saxén, "Data-driven analysis of sulfur flows and behavior in the blast furnace," *Steel Res. Int.*, vol. 79, pp. 671–677, Sep. 2008.
- [4] J. Zeng, C. Gao, and H. Su, "Data-driven predictive control for blast furnace ironmaking process," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 34, pp. 1854–1862, Nov. 2010.
- [5] D. Wang, "Robust data-driven modeling approach for real-time final product quality prediction in batch process operation," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 7, pp. 371–377, May 2011.
- [6] C. Gao, L. Jian, X. Liu, and J. Chen, "Data-driven modeling based on Volterra series for multidimensional blast furnace system," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 22, pp. 2272–2283, Dec. 2011.
- [7] H. Hjalmarsson, M. Gevers, S. Gunnarsson, and O. Lequin, "Iterative feedback tuning: theory and applications," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 18, pp. 26–41, Aug. 1998.
- [8] A. Karimi, L. Miskovic, and D. Bonvin, "Iterative correlation-based controller tuning," *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, vol. 18, pp. 645–664, Oct. 2004.
- [9] L. C. Kammer, "Stability assessment for cautious iterative controller tuning," *Automatica*, vol. 41, pp. 1829–1834, Oct. 2005.
- [10] R.-E. Precup, C. Borchescu, M.-B. Rădac, S. Preitl, C.-A. Dragoș, E. M. Petriu, and J. K. Tar, "Implementation and signal processing aspects of iterative regression tuning," in *Proc. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010)*, Bari, Italy, 2010, pp. 1657–1662.
- [11] J. C. Spall and J. A. Cristion, "Model-free control of nonlinear stochastic systems with discrete-time measurements," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 43, pp. 1198–1210, Sep. 1998.
- [12] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E. M. Petriu, and S. Preitl, "Application of IFT and SPSA to servo system control," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 22, pp. 2363–2375, Dec. 2011.
- [13] J. K. Bennighof, S.-H. Chang, and M. Subramaniam, "Minimum time pulse response based control of flexible structure," *J. Guid. Control Dyn.*, vol. 16, pp. 874–881, Oct. 1993.
- [14] G. Shi and R. E. Skelton, "Markov data-based LQG control," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 122, pp. 551–559, Sep. 2000.
- [15] R. Kadali, B. Huang, and A. Rossiter, "A data driven subspace approach to predictive controller design," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, pp. 261–278, Mar. 2003.
- [16] X. Wang, B. Huang, and T. Chen, "Data-driven predictive control for solid oxide fuel cells," *J. Process Control*, vol. 17, pp. 103–114, Feb. 2007.
- [17] X. Lu, H. Chen, P. Wang, and B. Gao, "Design of a data-driven predictive controller for start-up process of AMT vehicles," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 22, pp. 2201–2212, Dec. 2011.
- [18] W. Favoreel, B. De Moor, P. van Overschee, and M. Gevers, "Model-free subspace-based LQG-design," in *Proc. 1999 American Control Conference*, San Diego, CA, USA, 1999, vol. 5, pp. 3372–3376.
- [19] M. C. Campi, A. Lecchini, and S. M. Savaresi, "Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers," *Automatica*, vol. 38, pp. 1337–1346, Aug. 2002.
- [20] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E. M. Petriu, S. Preitl, and R.-C. David, "Stable iterative feedback tuning method for servo systems," in *Proc. 20th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2011)*, Gdansk, Poland, 2011, pp. 1943–1948.
- [21] D. A. Bristow, M. Tharayil, and A. G. Alleyne, "A survey of iterative learning control," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 26, pp. 96–114, Jun. 2006.
- [22] H.-S. Ahn, Y. Chen, and K. L. Moore, "Iterative learning control: brief survey and categorization," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 37, pp. 1109–1121, Nov. 2007.

- [23] D. H. Owens and J. Hätönen, "Iterative learning control – an optimization paradigm," *Annu. Rev. Control*, vol. 29, pp. 57–70, Apr. 2005.
- [24] S. Gunnarsson and M. Norrlöf, "On the design of ILC algorithms using optimization," *Automatica*, vol. 37, pp. 2011–2016, Dec. 2001.
- [25] M. Norrlöf and S. Gunnarsson, "Time and frequency domain convergence properties in iterative learning control," *Int. J. Control*, vol. 75, pp. 1114–1126, Sep. 2002.
- [26] M. Butcher, A. Karimi, and R. Longchamp, "Iterative learning control based on stochastic approximation," in *Proc. 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008, pp. 1478–1483.
- [27] H.-F. Chen and H.-T. Fang, "Output tracking for nonlinear stochastic systems by iterative learning control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, pp. 583–588, Apr. 2004.

E.2. Bibliografie aferentă capitolului B

- [B1] Driankov, D., H. Hellendoorn și M. Reinfrank (1993). *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [B2] Passino, K.M. and S. Yurkovich (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [B3] Sala, A., T.M. Guerra și R. Babuška (2005). Perspectives of fuzzy systems and control. *Fuzzy Sets and Systems*, 156, 432-444.
- [B4] Moon, B.S. (1995). Equivalence between fuzzy logic controllers and PI controllers for single input systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 69, 105-113.
- [B5] Precup, R.-E., Tomescu, M. L., Rădac, M.-B., Petriu, E. M., Preitl, St. and Dragoș, 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.
- [B6] 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.
- [B7] A.S. Bazanella, M. Gevers, L. Miskovic, and B.D.O. Anderson, "Iterative minimization of H₂ control performance criteria," *Automatica*, vol. 44, pp. 2549-2559, Oct. 2008.
- [B8] J. K. Huusom, H. Hjalmarsson, N.K. Poulsen, and S.B. Jørgensen, "A design algorithm using external perturbation to improve Iterative Feedback Tuning convergence," *Automatica*, vol. 47, pp. 2665-2670, 2011.
- [B9] 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.
- [B10] A. Al Mamun, W.Y. Ho, W.E. Wang, and T.H. Lee, "Iterative Feedback Tuning (IFT) of hard disk drive head positioning servomechanism," in *Proc. 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2007)*, Taipei, Taiwan, 2007, pp. 769-774.
- [B11] 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.
- [B12] S. Kisling, 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.
- [B13] 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.
- [B14] 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.
- [B15] 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.
- [B16] 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.
- [B17] 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.
- [B18] 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.
- [B19] 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.

E.3. Bibliografie aferentă capitolului C

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

E.4. BIBLIOGRAFIE PROPRIE (în 2015)

- lucrări publicate în reviste ISI cu factor de impact:

- [R1] M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Model-Free Primitive-Based Iterative Learning Control Approach to Trajectory Tracking of MIMO Systems With Experimental Validation, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, DOI: 10.1109/TNNLS.2015.2460258, 2015, impact factor (IF) = 4.291.
- [P1] R.-E. Precup and M. L. Tomescu, Stable fuzzy logic control of a general class of chaotic systems, *Neural Computing and Applications (Springer-Verlag)*, vol. 26, no. 3, pp. 541-550, 2015, impact factor (IF) = 1.569.
- [R2] M.-B. Rădac and R.-E. Precup (corresponding author), Data-based two-degree-of-freedom iterative control approach to constrained non-linear systems, *IET Control Theory & Applications*, vol. 9, no. 7, pp. 1000-1010, 2015, impact factor (IF) = 2.048.
- [P2] Cl. Pozna, R.-E. Precup (corresponding author) and P. Földesi, A novel pose estimation algorithm for robotic navigation, *Robotics and Autonomous Systems (Elsevier Science)*, vol. 63, pp. 10-21, 2015, impact factor (IF) = 1.256.
- [P3] R.-E. Precup, E. M. Petriu, M.-B. Rădac, St. Preitl, L.-O. Fedorovici and C.-A. Dragoș, Cascade control system-based cost effective combination of tensor product model transformation and fuzzy control, *Asian Journal of Control (John Wiley and Sons)*, vol. 17, no. 2, pp. 381-391, 2015, impact factor (IF) = 1.556.
- [P4] R.-E. Precup, M. L. Tomescu and E. M. Petriu, A Unified Anti-Windup Technique for Fuzzy and Sliding Mode Controllers, *International Journal of Computers, Communications & Control*, vol. 10, no. 6, pp. 815-827, 2015, impact factor (IF) = 0.746.
- [R3] M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Constrained Data-Driven Model-Free ILC-based Reference Input Tuning Algorithm, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 12, no. 1, pp. 137-160, 2015, impact factor (IF) = 0.649.

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

- [R4] R.-C. Roman, M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Data-Driven Optimal Model-Free Control of Twin Rotor Aerodynamic Systems, *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT 2015, Seville, Spain*, pp. 161-166, 2015, indexed in IEEE Xplore, INSPEC.
- [R5] M.-B. Rădac, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Optimal Motion Prediction Using a Primitive-based Model-Free Iterative Control Approach for Crane Systems, *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT 2015, Seville, Spain*, pp. 366-372, 2015, indexed in IEEE Xplore, INSPEC.
- [P5] R.-E. Precup, A.-D. Balint, M.-B. Rădac and E. M. Petriu, Backtracking Search Optimization Algorithm-based approach to PID controller tuning for torque motor systems, *Proceedings of 2015 9th Annual IEEE International Systems Conference SysCon 2015, Vancouver, BC, Canada*, pp. 127-132, 2015, indexed in IEEE Xplore, INSPEC.
- [P6] R.-E. Precup, E.-I. Voişan, E. M. Petriu, M.-B. Rădac and L.-O. Fedorovici, Implementation of Evolving Fuzzy Models of a Nonlinear Process, *Proceedings of 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2015, Colmar, Alsace, France*, vol. 1, pp. 5-14, 2015, indexed in SCOPUS, DBLP.

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