

**RAPORTARE ȘTIINȚIFICĂ INTERMEDIARĂ A CONTRACTULUI PN-III-P1-1.1-PD-2019-0637**  
privind implementarea proiectului în perioada ianuarie – decembrie 2021

**A. Sinteză generală asupra etapei a doua a proiectului**

Echipa de cercetare și rolurile membrilor care au desfășurat activități de cercetare în cadrul Etapei a 2-a a proiectului intitulat “*Regulatoare de tip data-driven dedicate sistemelor de aliaje cu memoria formeii*”, acronim: DDcSMAst, contract de finanțare nr. PD 41 / 2020, cod depunere PN-III-P1-1.1-PD-2019-0637, <http://www.aut.upt.ro/~raul.roman/PD2019.html>, este compusă din: As. Dr. Ing. Raul-Cristian ROMAN având calitate de director de proiect și Prof. Dr. Ing. Stefan PREITL având calitate de mentor.

**Etapa a 2-a** - Validarea noilor SRA cu regulatoare de timp data-driven prin intermediul partenerilor externi. Diseminarea rezultatelor prin publicarea acestora în revistele din domeniu cu factor de impact precum: IEEE Transactions on Industrial Informatics (red zone (Q1)), IEEE Transactions on Control Systems Technology (red zone (Q1)), IET Control Theory & Applications (red zone (Q1)), International Journal of General Systems (yellow zone (Q2)), și a conferințelor academice internaționale precum: American Control Conference (ACC 2021), 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2021), European Control Conference (ECC 2021).

**Principalele obiective** urmărite în cadrul Etapei a 2-a ce s-a desfășurat în perioada 01.01.2021 – 31.12.2021 au fost realizate conform planului de activitate și sunt grupate în **Activitatea 2.1** - Dezvoltarea unor regulatoare neliniare de tip data-driven. Propunerea unui nou mecanism pentru garantarea stabilității SRA cu regulatoare neliniare de tip data-driven utilizând metode diferite de stabilitate. Implementarea, testarea, verificarea și validarea regulatoarelor neliniare bazate pe data-driven prin simulări și rezultate experimentale pe echipamente de laborator în legătură cu SMA. Implementarea și testarea regulatoarelor de tip data-driven propuse folosind modele matematice care simulează comportamentul proceselor disponibile pentru partenerii noștri din industrie. Validarea regulatoarelor propuse către partenerii noștri externi. Diseminarea rezultatelor prin publicarea acestora într-una din revistele de top din domeniu precum IEEE Transactions on Industrial Informatics (zona roșie (Q1)), IEEE Transactions on Control Systems Technology (zona roșie (Q1)), IET Control Theory & Applications (zona roșie (Q1)), International Journal of General Systems (zona galbenă (Q2)). Valorificarea rezultatelor prin participarea cu lucrare la o conferință internațională de specialitate cu vizibilitate ridicată, indexate în Clarivate Analytics Web of Science precum: American Control Conference (ACC 2021), 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2021) sau European Control Conference (ECC 2021). Realizarea unei analize SWOT a calității muncii împreună cu mentorul. Rezolvarea punctelor slabe și a amenințărilor identificate. Asigurarea managementului extern al proiectului prin colaborarea cu alte echipe de cercetare din domeniul de cercetare bazat pe reglare, care au preocupări similare (Cluj, București, Iași, Timișoara, Craiova) prin audit extern. Rezolvarea tuturor punctelor slabe și a amenințărilor identificate. Pregătirea rapoartelor pentru documentarea activităților.

Activitatea 2.1 a presupus studiul și îmbunătățirea soluțiilor de reglare automată cu regulatoare de tip data-driven existente cu detaliile aferente prezentate în cadrul secțiunii B și pregătirea și transmiterea a 4 lucrări de revistă indexate în *Clarivate Analytics Web of Science* [D1-D4] și a 3 lucrări publicate în cadrul conferințelor internaționale de specialitate cu vizibilitate ridicată ce vor fi indexate în *Clarivate Analytics Web of Science* [D5-D7]. Tot în cadrul acestei activități a fost publicată o carte cu vizibilitate ridicată [D8] și un capitol de carte cu vizibilitate ridicată [D9]. În momentul de față o parte din lucrări au fost acceptate și publicate, iar celelalte lucrări transmise se află în faza de recenzie.

Livrabilele proiectului pentru anul **2021** sunt următoarele:

- Raport de cercetare.
- Nouă lucrări publicate: [D1]–[D9].
- 3 lucrări [D1], [D3], [D4] publicate în reviste indexate în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge) cu factor de impact.
- 1 lucrare [D2] acceptată în revistă indexată în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge) cu factor de impact.
- 2 lucrări [D6], [D7] publicată în volum de conferință indexată în baze de date internaționale (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus, DBLP).
- 1 lucrare [D5] prezentată la o conferință al cărui volum va fi indexat în baze de date internaționale (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus, DBLP).

- 1 carte [D8] publicată.
- 1 capitol de carte [D9] publicat în Springer.
- Factor de impact cumulat al lucrărilor publicate conform 2020 Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2021 = 8.112.
- Reviste cu factor de impact ridicat în care au fost publicate lucrările: International Journal of Computational Intelligence Systems, Romanian Journal of Information Science and Technology, International Journal of Systems Science, Asian Journal of Control.
- Conferințe cu vizibilitate ridicată în volumele cărora au fost publicate lucrările: 4th IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control CESCIT 2021, 30th International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2021, 8th International Conference on Information Technology and Quantitative Management ITQM 2020 & 2021.

#### Remarci:

- Studiul bibliografic menționat în secțiunea B este detaliat în secțiunea C, iar rezultatele obținute pe parcursul anului 2021 sunt detaliate în secțiunea D.
- Lucrările științifice publicate conțin atât rezultate de simulare cât și experimente, validările au fost realizate pe echipamente de laborator cu elemente de execuție bazate pe aliajele cu memoria formei (engl. shape memory alloy – SMA); acestea sunt detaliate în cadrul secțiunii D.
- Rezultatele obținute apar în pagina web a proiectului: <http://www.aut.upt.ro/~raul.roman/PD2019.html>.

#### **B. Dezvoltarea cadrului teoretic ce permite dezvoltarea și implementarea soluțiilor de reglare cu reglatoare de tip data-driven**

*Aliajele cu memoria formei (engl. shape memory alloy – SMA) [1]-[5] sunt cunoscute ca fiind materiale metalice, numite și “materiale inteligente”, avantajul principal a acestor materiale este că sunt silențioase, iar ele acționează prin contracție asemănător mușchilor umani [6], ceea ce le face utile precum elemente de execuție din componența sistemelor de reglare automată (SRA). Standurile de tip SMA sunt proiectate atât în scop didactic pentru a demonstra comportamentul SMA și pentru a învăța despre elementele de execuție bazate pe SMA, cât și în scop științific pentru a evidenția comportamentul neliniar al SMA, pentru a determina modelul matematic aferent și a proiecta reglatoare pentru reglarea poziției.*

Dezavantajele SMA sunt eficiența energetică scăzută, lățimea de bandă redusă datorită vitezei de răcire lentă a aerului și dificultatea de garantare a erorii de reglare staționare nule. O alternativă față de reglatoarele clasice este reprezentată de reglatoarele de tip data-driven (RgDD) [7]-[18], care în prezent reprezintă un subiect de interes atât în mediul științific cât și în industrie. Avantajul RgDD este acela că ele folosesc doar datele de intrare/ieșire ale procesului condus (PC), iar această caracteristică este utilă atunci când modelul matematic al PC este complex sau identificarea sa este foarte dificilă. Acesta este motivul principal al interesului ridicat pentru reglatoarele neliniare ai căror parametri sunt obținuți utilizând datele de intrare/ieșire al PC [7]-[18]. Alte tehnici de reglare folosite pentru conducerea proceselor bazate pe SMA sunt reglatoarele bazate pe logica fuzzy [19]-[21].

Realizările anului 2021 din punct de vedere a cercetării au presupus îmbunătățirea algoritmilor de tip data-driven conform [D5] unde algoritmul data-driven Iterative Feedback Tuning (IFT) a fost validat experimental pe echipamentul de laborator de tip macara turn cu elemente de execuție bazate pe SMA; conform [D8] algoritmi de tip data driven Iterative Feedback Tuning (IFT), Model-Free Control (MFC), Model-Free Adaptive Control (MFAC) și Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) au fost validați prin simulări și experimente pe echipamentul de laborator de tip macara turn cu elemente de execuție bazate pe SMA; identificarea modelului matematic neliniar al echipamentului de tip SMA a fost realizată în [D2] unde modelul matematic neliniar a fost determinat folosind Evolving fuzzy Models; o altă variantă pentru identificarea modelului echipamentului de tip SMA este prin intermediul tehnicii de identificare Tensor Product, unde în [D2] a fost folosită pentru identificarea modelului matematic al echipamentului de laborator de tip macara turn cu elemente de execuție bazate pe SMA, iar în [D7] a fost folosită pentru identificarea modelului matematic al echipamentului de laborator de tip sistem servo cu elemente de execuție bazate pe SMA; conform [D1], [D3], [D6] și [D9] tehnicile fuzzy sunt folosite cu brio pentru echipamentele de laborator de tip sistem servo [D1], [D3], sistem de ambreaj acționat electromagnetic [D6] și roboți mobili [D9], echipamente cu elemente de execuție bazate pe SMA.

Lucrarea [D5] și-a propus validarea algoritmului IFT, un algoritm clasic de tip data-driven care este validat experimental pe echipamentul de laborator de tip macara turn cu elemente de execuție bazate pe SMA.

Algoritmul IFT este aplicat pentru a îmbunătăți performanțele a trei regulatoare de tip proporțional-integrator (PI) rezolvând o problemă de optimizare. Experimentele au fost realizate pe echipamentul de laborator de tip macara turn cu elemente de execuție bazate pe SMA, echipament cu neliniarități puternice. Sunt efectuate zece iterații pentru a evidenția performanțele sistemului de regulare automată folosind regulatoare IFT.

Problema de optimizare cu funcția obiectiv utilizată ca criteriu pătratic în algoritmii IFT este [22], [23], [D5], [D8]:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} J(\theta), J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \{[\delta y(k, \theta)]^2 + \lambda[u(k, \theta)]^2\}, \quad (1)$$

unde  $\theta^*$  este vectorul parametrilor optimali obținut utilizând IFT,  $\theta$  este parametrul vectorului al regulatorului, în care pentru regulatorul PI valoarea lui  $\theta$  este  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ ,  $N$  reprezintă numărul de eșantioane,  $\lambda$  este un parametru de pondere mic,  $y$  este ieșirea procesului, iar  $u$  este intrarea (comanda) procesului. Gradientul estimat al funcției obiectiv este [22], [23], [D5], [D8]:

$$\text{est} \left[ \frac{\partial J}{\partial \theta}(\theta) \right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[ \delta y(k, \theta) \cdot \text{est} \left[ \frac{\partial \delta y}{\partial \theta}(k, \theta) \right] + \lambda u(k, \theta) \cdot \text{est} \left[ \frac{\partial u}{\partial \theta}(k, \theta) \right] \right], \quad (2)$$

în care  $\text{est} \left[ \frac{\partial \delta y}{\partial \theta}(k, \theta) \right]$  și  $\text{est} \left[ \frac{\partial u}{\partial \theta}(k, \theta) \right]$  sunt estimările imparțiale ale gradientilor și eroarea de ieșire (sau eroarea de urmărire),  $\delta y(k, \theta)$  este diferența dintre ieșirea procesului condus  $y(k, \theta)$  obținută și ieșirea modelului de referință  $r_F(k)$  [D5], [D8]:

$$\delta y(k, \theta) = y(k, \theta) - r_F(k). \quad (3)$$

Înainte de a obține parametrii optimali, algoritmul IFT necesită de un experiment inițial sau normal pentru colectarea și măsurarea vectorului de intrare (de comandă) a procesului  $u(k)$ , vectorului de ieșire a procesului  $y(k)$  și vectorul erorii de reglare  $e(k)$  după aplicarea intrării de referință  $r(k)$ . În al doilea experiment sau experimentul cu gradient, eroarea de reglare  $e(k)$  din experimentului normal este utilizată ca model de referință. Parametrii colectați în experimentul normal vor avea indicele inferior 1, iar parametrii colectați în experimentul cu gradient vor avea indicele inferior 2 pentru a simplifica notațiile. Apoi, vectorul de intrare a procesului  $u(k)$  și vectorul de ieșire a procesului  $y(k)$  sunt colectate pentru a se calcula estimatele derivatelor [22], [23], [D5], [D8]:

$$\text{est} \left[ \frac{\partial \delta y}{\partial \theta}(k, \theta) \right] = \frac{1}{C(z^{-1}, \theta)} \cdot \frac{\partial C}{\partial \theta}(z^{-1}, \theta) \cdot y_2(k, \theta), \quad (4)$$

$$\text{est} \left[ \frac{\partial u}{\partial \theta}(k, \theta) \right] = \frac{1}{C(z^{-1}, \theta)} \cdot \frac{\partial C}{\partial \theta}(z^{-1}, \theta) \cdot u_2(k, \theta), \quad (5)$$

în care  $C(z^{-1}, \theta) = \frac{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$  este funcția de transfer în timp discret a regulatorului PI. Folosind relațiile (4) și (5), derivatele în raport cu parametrii regulatorului sunt [D5], [D8]:

$$\frac{1}{C(z^{-1}, \theta)} \cdot \frac{\partial C}{\partial \theta}(z^{-1}, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C(z^{-1}, \theta)} \cdot \frac{\partial C}{\partial \theta_1}(z^{-1}, \theta) \\ \frac{1}{C(z^{-1}, \theta)} \cdot \frac{\partial C}{\partial \theta_2}(z^{-1}, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - z^{-1}}{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}} \\ \frac{1 - z^{-1}}{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}} \cdot \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}} \\ \frac{z^{-1}}{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

prin urmare,

$$\text{est} \left[ \frac{\partial \delta y}{\partial \theta}(k, \theta) \right] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}} \cdot y_2(k, \theta) \\ \frac{z^{-1}}{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}} \cdot y_2(k, \theta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\text{est} \left[ \frac{\partial u}{\partial \theta}(k, \theta) \right] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}} \cdot u_2(k, \theta) \\ \frac{z^{-1}}{\theta_1 + \theta_2 z^{-1}} \cdot u_2(k, \theta) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Vectorul parametrilor regulatorului vor fi actualizați ținând seama de [22], [23], [D5], [D8]:

$$\boldsymbol{\theta}^{i+1} = \boldsymbol{\theta}^i - \gamma_i (\mathbf{R}^i)^{-1} \text{est} \left[ \frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}} (\boldsymbol{\theta}^i) \right], \quad (9)$$

în care  $\gamma_i = \frac{\gamma_0}{j^\alpha}$  este un număr pozitiv care determină pasul iterației,  $\gamma_0 > 0$  este pasul inițial,  $j \in \mathbf{N}, j \geq 1, \alpha \in (0.5, 1]$ , și  $(\mathbf{R}^i)^{-1}$  este aproximarea Gauss-Newton a Hesianeii lui  $J$ , care în continuare va fi considerată ca fiind matrice identitate [D5].

Pe baza părții teoretice enunțate mai sus sunt formulate următoarele etape de proiectare a SRA cu algoritmul IFT [D5], [D8]:

*Etapa 1:* Determinarea parametrilor regulatorului PI în timp continuu folosind criteriul optimului simetric extins și discretizarea acestuia printr-o metodă de discretizare luând în considerare o valoare mică a timpului de eșantionare, apoi experimentul normal (inițial) este realizat folosind vectorul referințelor (ieșirea modelului de referință)  $r(k)$  pentru a colecta și măsura vectorul de intrare (comandă) a procesului  $u(k)$ , vectorul de ieșire a procesului  $y(k)$  și vectorul erorii de reglare  $e(k)$ .

*Etapa a 2-a.* Parametrii specifici algoritmului IFT,  $\gamma_0 > 0$  (pasului inițial) și  $\alpha \in (0.5, 1]$  sunt aleși.

*Etapa a 3-a.* Experimentul gradient este realizat luând în considerare eroarea de reglare din experimentul anterior ca vector de referință. Relațiile (7) și (8) sunt apoi înlocuite în (2), iar estimata gradientului lui  $J$  este calculată conform relației (2). Vectorul parametrilor optimali ai regulatorului PI este calculat conform relației (9).

*Etapa a 4-a.* Cu parametrii PI IFT obținuți după primul experiment cu gradient din *Etapa a 3-a*, se efectuează un experiment în buclă închisă.

*Etapa a 5-a.* Etapele 3 și 4 se repetă pentru îmbunătățirea funcției obiectiv. În cazul de față, *Etapele 3 și 4* se repetă de zece ori. După fiecare experiment în buclă închisă, funcția obiectiv este măsurată pentru a verifica convergența algoritmului. Schema bloc a SRA cu algoritmul IFT în cazul Single Input-Single Output (SISO) este prezentată în Fig. 1.

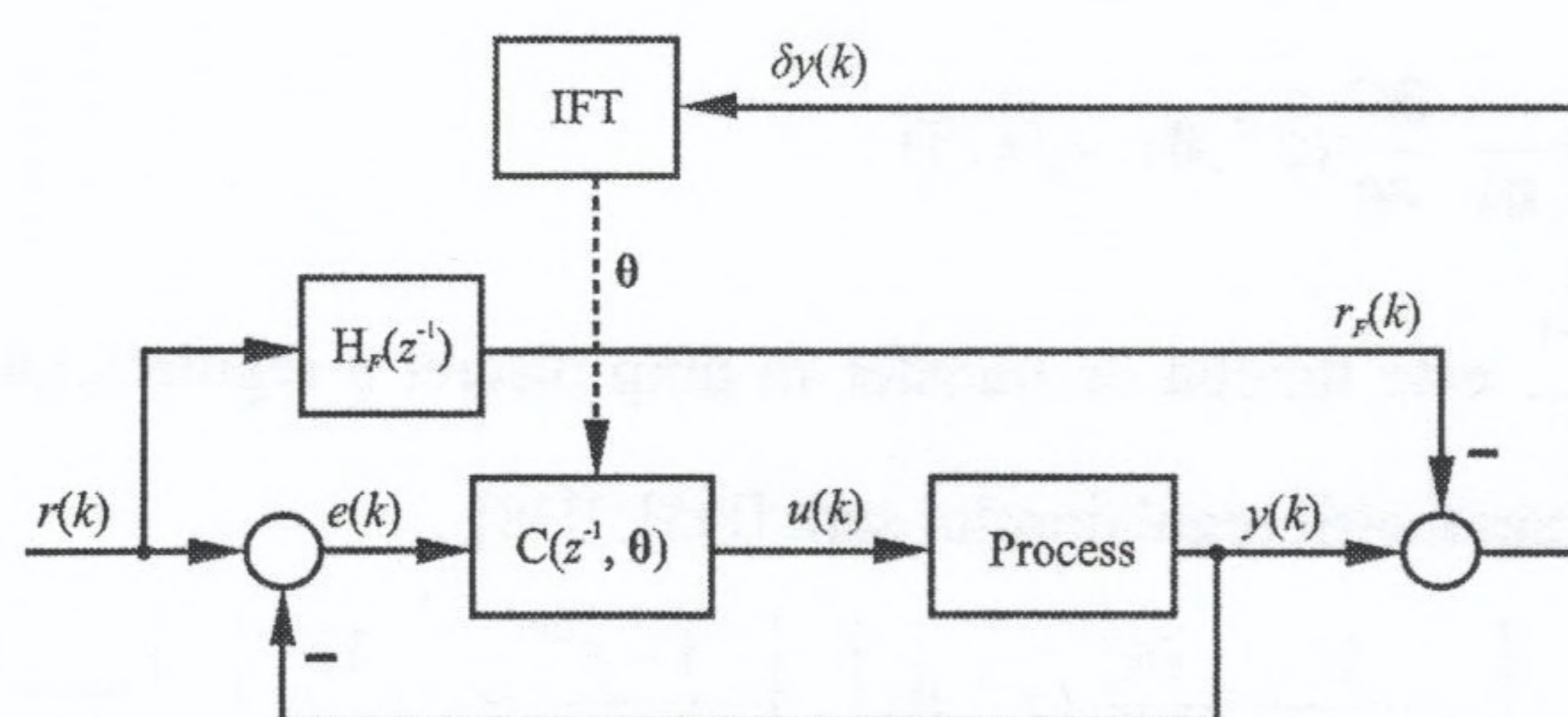


Fig. 1. Schema bloc a SRA cu algoritmul IFT.

Echipamentul de laborator de tip macara turn are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA și este un echipament de laborator de trei grade cu neliniarități puternice care permite reglarea poziției căruciorului, poziției unghiulare a brațului macaralei și a poziției greutății macaralei. Ecuațiile de stare neliniare care descriu comportamentul echipamentului ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA sunt [24], [25], [D5], [D8]:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= v_5, \dot{v}_2 = v_6, \dot{v}_3 = v_7, \dot{v}_4 = v_8, \\ \dot{v}_5 &= f_5(\Pi), \dot{v}_6 = f_6(\mathbf{II}), \dot{v}_7 = m_1, \dot{v}_8 = m_2, \dot{v}_9 = v_{10}, \\ \dot{v}_{10} &= [-\mu_L v_{10} / m_L + g - 2v_6 v_{10} \sin v_1 \sin v_2 + 2v_5 v_{10} \cos v_1 \cos v_2 - 2v_5 v_6 v_9 \cos v_1 \sin v_2 \\ &\quad - v_9 f_6(\mathbf{II}) \sin v_1 \sin v_2 + v_9 f_5(\Pi) \cos v_1 \cos v_2 - v_9 (v_5^2 + v_6^2) \sin v_1 \cos v_2 + m_3 / m_L] / (1 - \sin v_1 \cos v_2), \\ f_5(\Pi) &= f_5(v_1, v_2, v_3, v_6, v_8, v_9, u_1, u_2) = -(2g \sin v_1 \cos v_2 + 4v_7 v_8 \cos v_1 \\ &\quad - v_8^2 v_9 \sin(2v_1) \cos^2 v_2 - 2v_3 v_8^2 \sin v_1 \sin v_2 - 4v_6 v_8 v_9 \cos^2 v_1 \cos v_2 + v_6^2 v_9 \sin(2v_1) \\ &\quad + 2m_1 \sin v_1 \sin v_2 + 2u_2 v_3 \cos v_1 - 2u_2 v_9 \sin v_2) / (2v_9), \\ f_6(\mathbf{II}) &= f_6(v_1, v_2, v_3, v_5, v_6, v_8, v_9, u_1, u_2) = -[g \sin v_2 + v_3 v_8^2 \cos v_2 - v_8^2 v_9 \cos v_1 \cos v_2 \sin v_2 \\ &\quad + 2v_5 v_8 v_9 \cos v_1 \cos v_2 - 2v_3 v_6 v_9 \sin v_1 - m_1 \cos v_2 + u_2 v_9 \sin v_1 \cos v_2] / (v_9 \cos v_1), \\ y_1 &= v_3, y_2 = v_4, y_3 = v_9, \end{aligned} \quad (10)$$

în care prima ieșire (adică poziția căruciorului) a macaralei turn ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA este  $y_1(m) = v_3(m) \in [-0,25, 0,25]$ , viteza căruciorului este  $v_7(m/s)$ , a doua ieșire (adică poziția unghiulară a brațului) a macaralei turn ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA este  $y_2(rad) = v_4(rad) \in [-1,57, 1,57]$ , viteza unghiulară a brațului macaralei este  $v_8(rad/s)$ , a treia ieșire (adică poziția greutății) a macaralei turn ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA este  $y_3(m) = v_9(m) \in [-0,4, 0,4]$ , viteza liniei de ridicare este  $v_{10}(m/s)$ , unghiurile poziției greutății în planul xz sunt descrise de  $v_1(rad)$  și  $v_2(rad)$ , argumentul timp este omis în relația (10) pentru simplificarea relațiilor modelului matematic, expresiile funcțiilor neliniare  $f_5$  și  $f_6$  sunt date în [24], [25], vitezele unghiulare care utilizează poziția greutății macaralei în planul xz sunt descrise de  $v_5(rad)$  și  $v_6(rad)$  și  $m_i$  sunt ieșiri nemăsurabile ale neliniarităților statice de saturație și zonă moartă specifice motoarelor de curent continuu a macaralei turn ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA [24], [25], [D5], [D8]:

$$m_i(t) = f(u_{ai}, u_{bi}, u_{ci}, u(t)) = \begin{cases} -1, & \text{if } u_i(t) \leq -u_{bi}, \\ \frac{u_i(t) + u_{ci}}{u_{bi} - u_{ci}}, & \text{if } -u_{bi} < u_i(t) < -u_{ci}, \\ 0, & \text{if } -u_{ci} \leq u_i(t) \leq u_{ai}, \\ \frac{u_i(t) - u_{ai}}{u_{bi} - u_{ai}}, & \text{if } u_{ai} < u_i(t) < u_{bi}, \\ 1, & \text{if } u_i(t) \geq u_{bi}, \quad i \in \{1,2,3\}, \end{cases} \quad (11)$$

$t \in \mathbf{R}$ ,  $t \geq 0$  este un argument independent de timp continuu,  $u_i$  sunt intrările neliniarităților, iar  $0 < u_{ai} < u_{bi}$ ,  $0 < u_{ci} < u_{bi}$ ,  $i \in \{1,2,3\}$ . Pentru motorul de curent continuu în cazul poziției căruciorului  $m_1(t) = f(u_{a1}, u_{b1}, u_{c1}, u_1(t)) \in [-1, 1]$  cu  $u_{a1} = 0.1925$ ,  $u_{b1} = 1$  și  $u_{c1} = 0.2$ , pentru motorul de curent continuu în cazul poziției unghiulare a brațului macaralei  $m_2(t) = f(u_{a2}, u_{b2}, u_{c2}, u_2(t)) \in [-1, 1]$  cu  $u_{a2} = 0.18$ ,  $u_{b2} = 1$  și  $u_{c2} = 0.1538$ , pentru motorul de curent continuu în cazul greutății macaralei  $m_3(t) = f(u_{a3}, u_{b3}, u_{c3}, u_3(t)) \in [-1, 1]$  cu  $u_{a3} = 0.1$ ,  $u_{b3} = 1$  și  $u_{c3} = 0.13$ . Echipamentul de laborator de tip macara turn are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA este controlat folosind trei cicluri de lucru de tip Pulse With Modulation (PWM) ale motoarelor de curent continuu  $u_1(\%)$ ,  $u_2(\%)$  și  $u_3(\%)$  cu limitări între  $\pm 100\%$  pentru reglarea poziției căruciorului, reglarea poziției unghiulare a brațului macaralei și reglarea greutății macaralei [D5], [D8].

Trei bucle de reglare SISO sunt propuse pentru a valida experimental reglatoarele PI ai căror parametri sunt acordați optimal folosind trei algoritmi IFT, fiecare după 10 iterații. Condițiile preliminare ale structurii de reglare pentru toate cele trei bucle SISO în vederea evaluării funcției obiectiv din relația (1) sunt: condiții inițiale nule în raport cu modelul matematic dat de relația (10), nu se aplică perturbații suplimentare de tip sarcină, pot apărea doar perturbații aleatorii, perioada de eșantionare este  $T_s = 0.01$  sec, răspunsurile vectorului referințelor (ieșirile modelelor de referință) sunt similare cu figurile Lissajous filtrate prin trei modele de referință cu funcțiile de transfer în timp discret  $H_{F1}(z^{-1}) = \frac{0.04877}{1 - 0.9512z^{-1}}$ ,  $H_{F2}(s) = \frac{0.0465}{1 - 0.9535z^{-1}}$  și

$$H_{F3}(s) = \frac{0.03278}{1 - 0.9672z^{-1}}, \text{ acestea sunt ilustrate cu linie neagră continuă în Fig. 2, iar ele sunt corespunzătoare}$$

reglării poziției căruciorului,  $r_{F1}(k)$ , poziției unghiulare a brațului macaralei,  $r_{F2}(k)$  și poziția greutății macaralei,  $r_{F3}(k)$ , ale echipamentului de laborator de tip macara turn cu elemente de execuție bazate pe SMA; indicii inferiori 1, 2 și 3 sunt utilizați pentru a reprezenta reglarea poziției căruciorului, reglarea poziției unghiulare a brațului macaralei și reglarea poziției greutății macaralei [D5], [D8].

Parametrii inițiali ai reglatoarelor PI se obțin după aplicarea criteriului optimului simetric extins [26], [27] obținând [D5]:

$$\theta_1^0 = [7.9787 \quad -7.7817], \theta_2^0 = [4.1589 \quad -4.0562], \theta_3^0 = [12 \quad -11.7037]. \quad (12)$$

Pentru configurarea algoritmului data-driven IFT, parametrii sunt parametrii care trebuie aleși sunt parametrii secvenței mărimii pasului  $\alpha = 1$  și dimensiunea inițială a pasului  $\gamma_0 = 0.001$  pentru reglarea poziției căruciorului,  $\gamma_0 = 0.0001$  pentru reglarea poziției unghiulare a brațului macaralei și  $\gamma_0 = 0.01$  pentru reglarea poziției greutății macaralei. Parametrii optimali ai regulatorului PI obținuți după rezolvarea problemei de optimizare din relația (1) după parcurgerea a zece iterații prin algoritmul data-driven IFT sunt [D5]:

$$\theta_1^{10} = [7.9789 \quad -7.7815], \theta_2^{10} = [4.1590 \quad -4.0562], \theta_3^{10} = [12.0012 \quad -11.7026]. \quad (13)$$

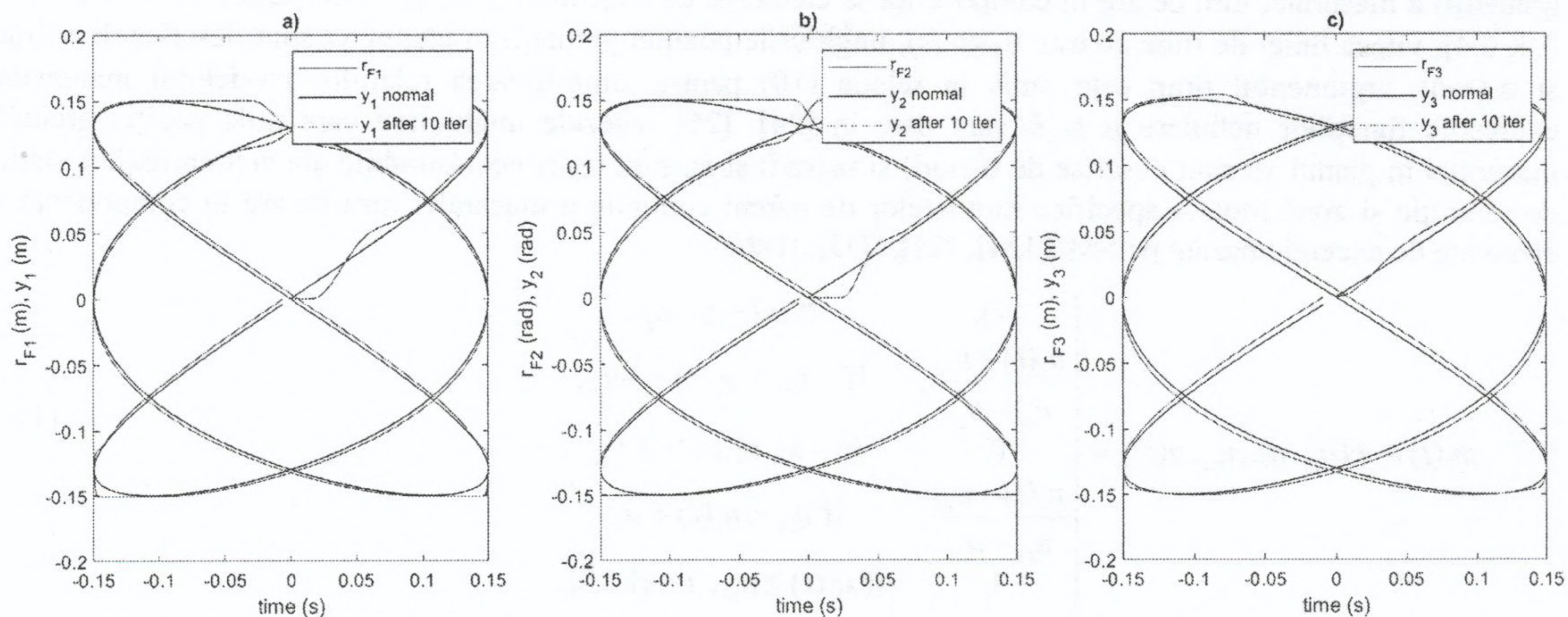


Fig. 2. Rezultatele experimentale ale experimentului inițial și după 10 iterații după aplicarea algoritmilor IFT. Condițiile inițiale și tranzitorii sunt clar conturate [D5].

Evoluțiile funcțiilor obiectiv din relația (1) după zece iterații sunt prezentate în Fig. 3: în a) pentru poziția căruciorului, în b) pentru poziția unghiulară a brațului macaralei și în c) pentru poziția greutății macaralei. Rezultatele experimentale după experimentul inițial și după 10 iterații folosind algoritmul data-driven IFT sunt prezentate în Fig. 3 după cum urmează: în a) pentru poziția căruciorului, în b) pentru poziția unghiulară a brațului macaralei și în c) pentru poziția greutății macaralei [D5].

Conform celor din Fig. 3, funcția obiectiv converge lent pentru toate sistemele de reglare automată și conform Fig. 2, o mică îmbunătățire a răspunsurilor sistemelor de reglare automată este obținută după zece iterații în comparație cu răspunsurile după experimentul normal (inițial). Iterații suplimentare sunt necesare pentru a realiza o îmbunătățire semnificativă a răspunsurilor sistemelor de reglare automată, dar în acest caz dezavantajul algoritmilor propuși va fi că algoritmul data-driven IFT va necesita mai mult timp în comparație cu alți algoritmi data-driven precum MFAC, MFC, ADRC sau VRFT [D5].

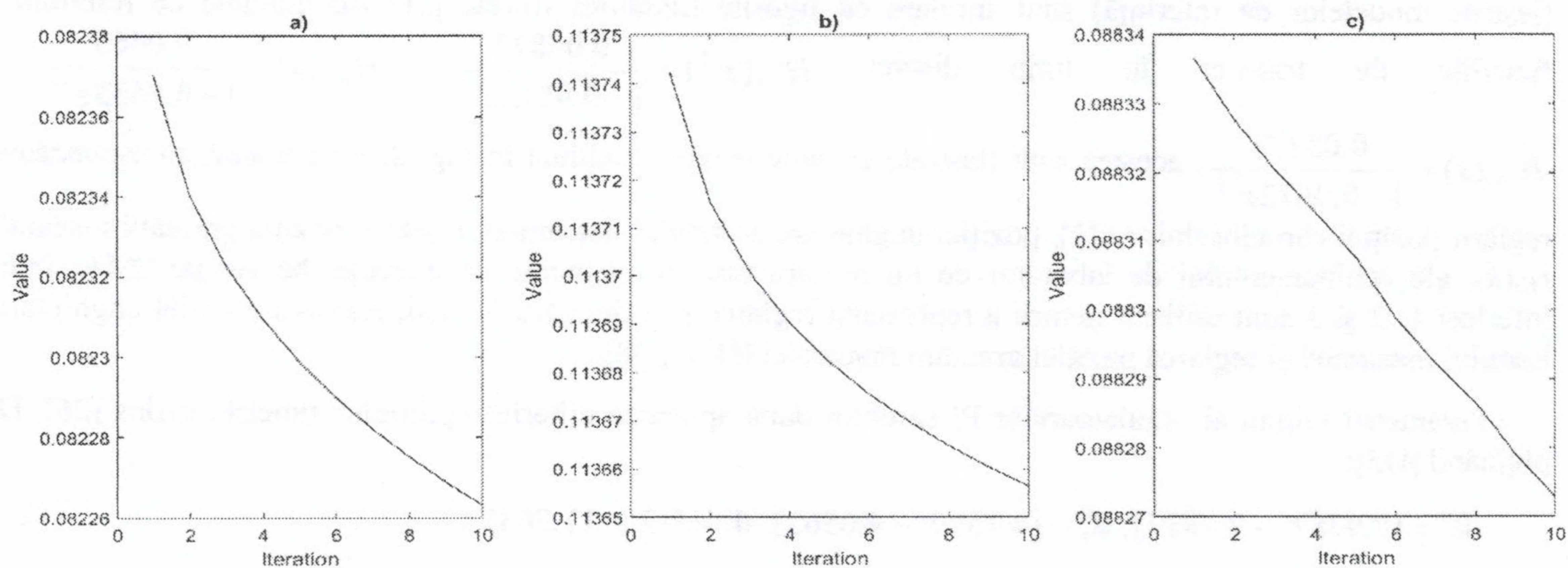


Fig. 3. Evoluțiile funcțiilor obiectiv după zece iterații [D5].

În lucrarea [D5] au fost propuse trei structuri de reglare automată de tip SISO cu regulatoare PI ai căror parametri au fost determinați optimal utilizând algoritmul data-driven IFT prin reglarea poziției căruciorului, a poziției unghiulare a brațului macaralei și a poziției greutății macaralei a echipamentului de laborator de tip macara turn ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA. Lucrarea [D5] a propus trei bucle de reglare SISO în loc de una singură Multi Input-Multi Output (MIMO) pentru a evidenția mai bine convergența algoritmului data-driven IFT pentru mai multe mișcări a echipamentului de laborator de tip macara turn ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA. Rezultatele experimentale dezvăluie după zece iterații o convergență lentă a funcției obiectiv, ceea ce duce la o performanță mai bună a structurii de reglare cu regulator PI ai căror parametri au fost determinați optimal folosind algoritmul data-driven IFT. Algoritmul data-driven IFT asigură pentru toate cele trei bucle de reglare SISO o performanță mai bună decât cea obținută cu regulatorul inițial PI inițial cărui parametri au fost determinați folosind criteriul optimului simetric extins.

Stabilitatea buclei de reglare este asigurată prin intermediul criteriului lui Jury, acest lucru realizându-se prin liniarizarea modelului matematic din relația (10), parcurgând pașii următori:

Ecuția caracteristică

$$\Delta(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0 \text{ cu } a_n > 0 \quad (14)$$

a sistemului de reglare automată este utilizată pentru a construi tabelul pentru testul de stabilitate Jury prezentat în tabelul 1.

$$b_k = \begin{vmatrix} a_0 & a_{n-k} \\ a_n & a_k \end{vmatrix}, c_k = \begin{vmatrix} b_0 & b_{n-1-k} \\ b_{n-1} & b_k \end{vmatrix}, d_k = \begin{vmatrix} c_0 & c_{n-2-k} \\ c_{n-2} & c_k \end{vmatrix}, \dots, \quad (15)$$

$$q_0 = \begin{vmatrix} p_0 & p_3 \\ p_3 & p_0 \end{vmatrix}, q_1 = \begin{vmatrix} p_0 & p_2 \\ p_3 & p_1 \end{vmatrix}, q_2 = \begin{vmatrix} p_0 & p_1 \\ p_3 & p_2 \end{vmatrix}.$$

Tabelul 1. Relativ la aplicarea criteriului de stabilitate Jury.

Rând	$z^0$	$z^1$	$z^2$	$\dots z^{n-k} \dots$	$z^{n-2}$	$z^{n-1}$	$z^n$
1	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$\dots a_{n-k} \dots$	$a_{n-2}$	$a_{n-1}$	$a_n$
2	$a_n$	$a_{n-1}$	$a_{n-2}$	$\dots a_k \dots$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
3	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$\dots b_{n-k} \dots$	$b_{n-2}$	$b_{n-1}$	—
4	$b_{n-1}$	$b_{n-2}$	$b_{n-3}$	$\dots b_k \dots$	$b_1$	$b_0$	—
5	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$\dots c_{n-k} \dots$	$c_{n-2}$	—	—
6	$c_{n-2}$	$c_{n-3}$	$c_{n-4}$	$\dots c_k \dots$	$c_0$	—	—
...	...	...	...	...	—	—	—
$2n-5$	$p_0$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	—	—	—
$2n-5$	$p_3$	$p_2$	$p_1$	$p_0$	—	—	—
$2n-3$	$q_0$	$q_1$	$q_2$	—	—	—	—

Tabelul 1. Tabelul pentru testul de stabilitate Jury.

Folosind tabelul pentru testul de stabilitate Jury prezentat în Tabelul 1, criteriul de stabilitate Jury este prezentat după cum urmează: Sistemul liniar cu polinomul caracteristic din relația (14) este stabil (adică toate rădăcinile polinomului sunt în interiorul cercului unitate) dacă și numai dacă sunt îndeplinite următoarele  $n+1$  condiții (cu  $a_n > 0$ ):

$$\begin{aligned} \Delta(1) &> 0, \\ \Delta(-1) &> 0 \text{ dacă } n \text{ este număr par,} \\ \Delta(-1) &< 0 \text{ dacă } n \text{ este număr impar,} \\ |a_0| &< a_n, \\ |b_0| &> |b_{n-1}|, \\ |c_0| &> |c_{n-2}|, \\ |d_0| &> |d_{n-3}|, \\ &\dots \\ |q_0| &> |q_2|. \end{aligned} \quad (16)$$

Pași pentru aplicarea criteriului lui Jury:

- se separă sistemul a cărui stabilitate este analizată, se identifică polinomul său caracteristic  $\Delta(z)$  și ordinul sistemului  $n$  este identificat;
- se calculează  $\Delta(1)$  și  $\Delta(-1)$  și se testează primele trei condiții din relația (16) (1), (2) și (3);
- dacă una dintre primele trei condiții din relația (16) nu este îndeplinită, criteriul este oprit, iar sistemul de reglare este instabil;
- în caz contrar, este construit tabelul 1 și celelalte  $(n-2)$  condiții sunt verificate una câte una; dacă una dintre condiții nu este îndeplinită, atunci criteriul este oprit și sistemul este instabil; în caz contrar, sistemul este stabil.

După cum este prezentat în tabelul 1, elementele rândurilor pare sunt elementele rândului precedent în ordine inversă. Elementele rândurilor impare sunt calculate în termeni de

În continuare, proiectul propune o abordare orientată spre dezvoltarea, îmbunătățirea, implementarea, testarea, verificarea și validarea reguletoarelor neliniare bazate pe data-driven prin simulări și rezultate experimentale pe echipamente de laborator în legătură cu SMA [13]-[15]. Noile SRA cu RgDD vor fi de asemenea validate și testate pe alte tipuri de echipamente de laborator.

Noile SRA cu RgDD vor fi validate și prin intermediul colaborărilor cu partenerii din mediul industrial (Continental Automotive Timișoara, Airbus Helicopters Romania, precum și prin relațiile de colaborare științifică directe consolidate în timp, Ontario Centre of Excellence prin intermediul colectivului din cadrul departamentului nostru cu colectivul din Ottawa, Canada din cadrul University of Ottawa). Colaborarea cu partenerul din Canada este clar evidențiată prin realizarea lucrărilor [D1]-[D5], [D7] și [D9].

Noul algoritm SRA cu RgDD propus în [D5] pentru a controla echipamentul de laborator de tip macara turn ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA a fost de testat și validat și pe echipamentul de laborator din cadrul Universității din Bremen, Germania prin intermediul partenerului nostru, Prof. Axel Gräser a echipei sale de cercetare.

Algoritmii reglare fuzzy adaptivi propuși în [D6] pentru reglarea poziției unui ambreiaj acționat electromagnetic cu elemente de execuție bazate pe aliaje cu memoria formei și modelele fuzzy evolutive propuse în [D2] pentru a caracteriza poziția unui proces reprezentativ construit în jurul SMA au fost testate și validate la Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași, Romania prin intermediul partenerului nostru Prof. Corneliu Lazar a echipei sale de cercetare și la Universitatea din Ljubljana, Slovenia, în colaborare cu Prof. Igor Škrjanc și Prof. Sašo Blažič și echipele de cercetare.

### C. Bibliografie

- [1] I.-C. Mituletu, G. R. Gillich, N. M.M. Maia, A method for an accurate estimation of natural frequencies using swept-sine acoustic excitation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 693-709, 2019.
- [2] K. Suhel, Yeswanth Sai, S.S. Mani Prabu, I.A. Palani, C.U. Amod, Pushendra Singh, Active control of smart shape memory alloy composite flapper for aerodynamic applications, *Proc. Int. Conf. on Robotics and Smart Manuf.*, 134-140, 2018.
- [3] Y. Kim, T. Jang, H. Gurung, N.A. Mansour, B. Ryu, B. Shin, Bidirectional rotating actuators using shape memory alloy wires, *Sens. and Actuat. A: Physical*, 295, 512-522, 2019.
- [4] E.J. Abdullah, P.S. Gaikwad, N. Azid, D.L. Abdul Majid, A.S. Mohd Rafie, Temperature and strain feedback control for shape memory alloy actuated composite plate, *Sens. and Actuat. A: Physical*, 238, 134-140, 2018.
- [5] S. Quintanar-Guzmán, S. Kannan, H. Voos, M. Darouach, M. Alma, Adaptive control for a Lightweight Robotic Arm Actuated by a Shape Memory Alloy Wire, *Proc. 16<sup>th</sup> Internat. Conf. on New Actuat.*, Bremen, Germany, 388-393, 2018.
- [6] H. Yang, M. Xu, W. Li, S. Zhang, Design and Implementation of a Soft Robotic Arm Driven by SMA Coils, *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, 66 (8), 6108-6116, 2019.
- [7] J.M.O. Barth, J.-P. Condomines, J.-M. Moschetta, A. Cabarbaye, C. Join, M. Fliess, Full Model-Free Control Architecture for hybrid UAVs, *Proc. 2019 Americ. Contr. Conf.*, 71-78, 2019.
- [8] C. Join, J. Bernier, S. Mottelet, M. Fliess, S. Rechdaoui-Guerin, S. Azimi, V. Rocher, A simple and efficient feedback control strategy for wastewater denitrification, *Proc. 20th IFAC World Congress*, Marseille, France, 1-6, 2017.
- [9] X. Bu, Z.S. Hou, H. Zhang, Data-driven multiagent systems consensus tracking using model free adaptive control, *IEEE Trans. Neural. Netw. Learn. Syst.*, 29 (5), 1514-1524, 2017.
- [10] J. Hou, S. Xiong, On model free adaptive control and its stability analysis, *IEEE Trans. Automa. Control*, doi 10.1109/TAC.2019.2894586, 1-14, 2019.
- [11] S. Formentin, M.C. Campi, A. Care, S. Savaresi, Deterministic continuous-time virtual reference feedback tuning (VRFT) with application to PID design, *Syst. & Learn. Lett.*, 127, 25-34, 2019.
- [12] R.-C. Roman, M.-B. Radac, C. Tureac, R.-E. Precup, Data-driven active disturbance rejection control of pendulum cart systems, *Proc. 2018 IEEE Conf. on Control Technology and Appl.*, Copenhagen, Denmark, 933-938, 2018.



- [13] R.-C. Roman, R.-E. Precup, E. M. Petriu, C.-A. Bojan-Dragos, V.-B. Vanya and M.-D. Rarinca, "Second Order Active Disturbance Rejection Control – Virtual Reference Feedback Tuning for Twin Rotor Aerodynamic Systems," 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2020), Toronto, Canada, 1-6, 2020.
- [14] R.-C. Roman, R.-E. Precup, E. M. Petriu, R.-C. David, E.-L. Hedrea and A.-I. Szedlak-Stinean, "First-Order Active Disturbance Rejection-Virtual Reference Feedback Tuning Control of Tower Crane Systems," 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC 2020), Sinaia, Romania, 1-6, 2020.
- [15] R.-C. Roman, R.-E. Precup and E. M. Petriu, "Hybrid Data-Driven Fuzzy Active Disturbance Rejection Control for Tower Crane Systems," *European Journal of Control*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2020.08.001>, 2020, <https://www.sciencedirect.com>.
- [16] R. Madonski, S. Shao, H. Zhang, Z. Gao, J. Yang, S. Li, General error-based active disturbance rejection control for swift industrial implementations, *Control Eng. Pract.*, 84, 218-229, 2019.
- [17] S. Satoh, K. Fujimoto, Iterative feedback tuning for Hamiltonian systems based on variational symmetry, *Int. Jour. Robust and Nonl. Control*, doi: <https://doi.org/10.1002/rnc.4692>, 1-21, 2019.
- [18] Y. Zhang, L. Sum, J. Shen, K.Y. Lee, Q.-C. Zhong, Iterative tuning of modified uncertainty and disturbance estimator for time-delay processes: a data-driven approach, *ISA Trans.*, 84, 164-177, 2019.
- [19] Y.M. Alsayed, A.A. Abouelsoud, M.R. Ahmed, F.E. Bab, Fuzzy logic-based PI controller design and implementation of shape memory alloy actuator, *Int. Journ. of Aut. Control*, 12 (3), 427-448, 2018.
- [20] J.M. Borges, A.A. Silva, C.J. De Araujo, R.L. Pimentel, A.S. de Aquino, R. Senko, R.P.B. dos Reis, On the active control of a rotor-bearing system using shape memory alloy actuators: an experimental analysis, *Journ. of the Braz. Soc. of Mechan. Sci. and Eng.*, 40 (5), 269-282, 2018.
- [21] A.H. Patriota Campos, E. de M Fernandes, J.J. da Silva, J.S. da R. Neto, Autotuned Fuzzy Based PID Deformation Control Of a Shape Memory Alloy Actuated Cantilever Beam, *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on Ind. Appl.*, 1187-1193, 2018.
- [22] H. Hjalmarsson, M. Gevers, S. Gunnarsson, O. Lequin, Iterative feedback tuning: theory and applications, *IEEE Control Syst Mag*, 18, 26–41, 1998.
- [23] H. Hjalmarsson, Iterative feedback tuning – an overview, *International Journal of Adaptive Control Signal Process*, 16, 373–395, 2002.
- [24] Tower Crane, User's Manual. Krakow, Poland: Inteco Ltd.; 2012.
- [25] R.-C. Roman, R.-E. Precup, E. M. Petriu, Hybrid data-driven fuzzy active disturbance rejection control for tower crane systems, *European Journal of Control*, 58, 373–387, 2021.
- [26] S. Preitl, R.-E. Precup, On the algorithmic design of a class of control systems based on providing the symmetry of open-loop Bode plots, *Sci Bull UPT Trans Autom Control Comput Sci*, 41, (2), 47–55, 1996.
- [27] S. Preitl S, R.-E. Precup, An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for PI and PID controllers, *Automatica*, 35, (10), 1731–1736, 1999.

#### D. Lucrări publicate și în curs de publicare

- **Lucrări de revistă:**

- [D1] R.-E. Precup, R.-C David, **R.-C. Roman**, E. M. Petriu, and A.-I. Szedlak-Stinenean, "Slime mould algorithm-based tuning of cost-effective fuzzy controllers for servo systems," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 14 (1), 1042-1053, 2021, impact factor (IF) = 1.736, IF according to 2020 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2021 = 1.736.
- [D2] R.-E. Precup, C.-A. Bojan-Dragos, E.-L. Hedrea, **R.-C. Roman** and E. M. Petriu, "Evolving Fuzzy Models of Shape Memory Alloy Wire Actuators," *Romanian Journal of Information Science and Technology (Romanian Academy, Section for Information Science and Technology)*, accepted, to be

published in 24 (3), 201-213, 2021, impact factor (IF) = 0.643, IF according to 2020 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2021 = 0.643.

- [D3] R.-E. Precup, R.-C David, **R.-C. Roman**, A.-I. Szedlak-Stinenean, and E. M. Petriu, "Optimal tuning of interval type-2 fuzzy controllers for nonlinear servo systems using Slime Mould Algorithm," International Journal of Systems Science, doi: <https://doi.org/10.1080/00207721.2021.1927236>, 1-16, 2021, impact factor (IF) = 2.281, IF according to 2020 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2021 = 2.281.
- [D4] E.-L. Hedrea, R.-E. Precup, **R.-C. Roman** and E. M. Petriu, "Tensor product-based model transformation approach to tower crane systems modeling," Asian Journal of Control, 23 (3), 1313-213, 2021, impact factor (IF) = 3.452, IF according to 2020 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2021 = 3.452.

• **Lucrări de conferință publicate:**

- [D5] **R.-C. Roman**, R.-E. Precup, E.-L. Hedrea, S. Preitl, I. A. Zamfirache, C.-A. Bojan-Dragos and E. M. Petriu, "Iterative Feedback Tuning Algorithm for Tower Crane Systems," The International Conference on Information Technology and Quantitative Management (ITQM 2020-2021), Chengdu, China, 1-8, 2021.
- [D6] C.-A. Bojan-Dragos, R.-E. Precup, S. Preitl, **R.-C. Roman**, E.-L. Hedrea and A.-I. Szedlak-Stinean, "GWO-Based Optimal Tuning of Type-1 and Type-2 Fuzzy Controllers for Electromagnetic Actuated Clutch Systems," The 4th IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control (CESCIT 2021), Valenciennes, France, 189-194, 2021.
- [D7] E.-L. Hedrea, R.-E. Precup, **R.-C. Roman**, E. M. Petriu, C.-A. Bojan-Dragos and I.-C. Hedrea, "Tensor Product-Based Model Transformation Technique Applied to Servo Systems Modeling," The 30th International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2021, Kyoto, Japan, 1-6, 2021.

• **Cărți publicate:**

- [D8] R.-E. Precup, **R.-C. Roman** and A. Safaei, "Data-Driven Model-Free Controllers," CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2021.

• **Capitole de carte publicate:**

- [D9] R.-E. Precup, E.-I. Viosan, R.-C. David, E.-L. Hedrea, E. M. Petriu, **R.-C. Roman** and A.-I. Szedlak-Stinean, "Nature-Inspired Optimization Algorithms for Path Planning and Fuzzy Tracking Control of Mobile Robots," Applied Optimization and Swarm Intelligence, 129-148, 2021.

Director Proiect,  
ROMAN Raul-Cristian

