

## RAPORT ȘTIINȚIFIC FINAL

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

Echipa de cercetare și rolurile membrilor care au desfășurat activități de cercetare în cadrul proiectului intitulat "*Regulatoare de tip data-driven dedicate sistemelor de aliaje cu memoria formei*", acronim: DDcSMA<sub>system</sub>, 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 1** - Analiza, proiectarea și implementarea unor soluții de reglare cu regulatoare neliniare: regulatoarele de tip data-driven (VRFT, MFC, MFAC, ADRC și SMC) în combinație cu alți algoritmi de reglare moderni (tehnicele de reglare fuzzy, regulator liniar pătratic, reglare în regim alunecător, rețele neuronale artificiale, lazy learning sau iterative learning control) în vederea îmbunătățirii performanțelor sistemului de reglare automată (SRA). Validarea noilor SRA cu regulatoare neliniare propuse prin intermediul experimentelor efectuate pe echipamente de laborator în legătură cu aliajele cu memoria formei (engl. shape memory alloy – SMA) și alte echipamente de laborator cu elemente de execuție bazate pe SMA.

**Principalele obiective** urmărite în cadrul primei etape s-a desfășurat pe parcursul lunilor august-decembrie 2020. Obiectivele au fost realizate conform planului de activitate și sunt grupate în

- **Activitatea 1.1** Analiza cercetării teoretice actuale și studierea aplicațiilor experimentale ale regulatoarelor neliniare propuse bazate pe regulatoarele de tip data-driven.

- **Activitatea 1.2** Cercetarea posibilităților de îmbunătățire a soluțiilor moderne de reglare și proiectarea de noi regulatoare neliniare bazate pe regulatoarele de tip data-driven.

- **Activitatea 4.1** 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)).

- **Activitatea 4.2** 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).

- **Activitatea 4.3** Îmbunătățirea continuă a parteneriatelor internaționale cu noi parteneri.

- **Activitatea 4.4** Continuarea colaborării cu partenerii industriali menționați anterior.

- **Activitatea 5.1** Realizarea unei analize SWOT a calității muncii împreună cu mentorul. Rezolvarea punctelor slabe și a amenințărilor identificate.

- **Activitatea 5.2** 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.

- **Activitatea 5.3** Pregătirea rapoartelor pentru documentarea activităților.

Activitatea 1.1 a presupus analiza cercetărilor teoretice actuale privind soluțiile de reglare existente pentru conducerea proceselor ce conțin aliaje cu memoria formei. Detaliile sunt prezentate în cadrul secțiunii B.

Activitatea 1.2 a presupus studiul și îmbunătățirea soluțiilor de reglare automată cu regulatoare de tip data-driven existente. Detaliile fiind prezentate în cadrul secțiunii B.

Activitățile 4.1, 4.2, 4.3 și 4.4 au presupus diseminarea și valorificarea rezultatelor publicarea acestora cu lucrare la conferințe internaționale de specialitate cu vizibilitate ridicată, indexate în Clarivate Analytics Web of Science și prin publicarea acestora într-una din revistele de top din domeniu clasificate în zona roșie (Q1) sau zona galbenă (Q2). Prin publicarea lucrărilor în reviste de top indexate în Clarivate Analytics Web of Science a fost asigurată continuarea colaborării cu partenerii industriali, iar în cadrul conferințelor internaționale de specialitate cu vizibilitate ridicată au fost stabilite noi posibile parteneriate internaționale cu parteneri din mediile academice și industriale.

Activitățile 5.1, 5.2 și 5.2 au presupus rezolvarea punctelor slabe și a amenințărilor prin realizarea unei analize SWOT a calității muncii împreună cu mentorul, asigurarea managementului extern al proiectului prin colaborarea cu alte echipe de cercetare din domeniul de cercetare bazat pe reglare și pregătirea rapoartelor pentru documentarea activităților.

Pentru anul 2020 livrabilele proiectului au presupus realizarea un raport științific intermediar și publicarea a trei lucrări, din care una de revistă indexată în *Clarivate Analytics Web of Science* [D1] două lucrări [D10] și [D11] publicate în volumele de conferință indexate în baze de date internaționale (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus, DBLP). Revista cu factor de impact ridicat în care a fost publicată lucrarea fiind *International Journal of Computers Communications & Control*. Conferințe cu vizibilitate ridicată în volumele cărora au fost publicate lucrările: 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2020) și First-Order Active Disturbance Rejection-Virtual Reference Feedback Tuning Control of Tower Crane Systems.

**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.
- **Activitatea 2.2** - Propunerea unui nou mecanism pentru garantarea stabilității SRA cu regulatoare neliniare de tip data-driven utilizând metode diferite de stabilitate.
- **Activitatea 2.3** - Implementarea, testarea, verificarea și validarea regulatoarelor neliniare bazate pe data-driven prin simulări și rezultate experimentale pe echipamente de laborator în legătură cu SMA.
- **Activitatea 1.2** Cercetarea posibilităților de îmbunătățire a soluțiilor moderne de reglare și proiectarea de noi regulatoare neliniare bazate pe regulatoarele de tip data-driven.
- **Activitatea 4.1** 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)).
- **Activitatea 4.2** 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).
- **Activitatea 4.3** Îmbunătățirea continuă a parteneriatelor internaționale cu noi parteneri.
- **Activitatea 4.4** Continuarea colaborării cu partenerii industriali menționați anterior.
- **Activitatea 5.1** Realizarea unei analize SWOT a calității muncii împreună cu mentorul. Rezolvarea punctelor slabe și a amenințărilor identificate.

- **Activitatea 5.2** 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.

- **Activitatea 5.3** Pregătirea rapoartelor pentru documentarea activităților.

Activitatea 2.1 aflată în strânsă legătură cu activitățile 2.2 și 2.3 au 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* [D2-D5] și a două lucrări publicate în cadrul conferințelor internaționale de specialitate cu vizibilitate ridicată ce vor fi indexate în *Clarivate Analytics Web of Science* [D12] și [D13]. Tot în cadrul acestei activități a fost publicată o carte cu vizibilitate ridicată [D21] și un capitol de carte cu vizibilitate ridicată [D22].

La fel ca și în cazul primei etape, activitățile 4.1, 4.2, 4.3 și 4.4 au presupus diseminarea și valorificarea rezultatelor publicarea acestora cu lucrare la conferințe internaționale de specialitate cu vizibilitate ridicată, indexate în *Clarivate Analytics Web of Science* și prin publicarea acestora într-una din revistele de top din domeniu clasificate în zona roșie (Q1) sau zona galbenă (Q2). Prin publicarea lucrărilor în reviste de top indexate în *Clarivate Analytics Web of Science* a fost asigurată continuarea colaborării cu partenerii industriali, iar în cadrul conferințelor internaționale de specialitate cu vizibilitate ridicată au fost stabilite noi posibile parteneriate internaționale cu parteneri din mediile academice și industriale.

La fel ca și în cazul primei etape, activitățile 5.1, 5.2 și 5.2 au presupus rezolvarea punctelor slabe și a amenințărilor prin realizarea unei analize SWOT a calității muncii împreună cu mentorul, asigurarea managementului extern al proiectului prin colaborarea cu alte echipe de cercetare din domeniul de cercetare bazat pe reglare și pregătirea rapoartelor pentru documentarea activităților.

Livrabilele proiectului pentru anul **2021** au constat în pregătirea unui raport de cercetare, publicarea a opt lucrări, din care patru lucrări [D2]–[D5] publicate în reviste indexate în *Clarivate Analytics Web of Science* (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge) cu factor de impact, două lucrări [D12] și [D13] publicate în volumele de conferință indexate în baze de date internaționale (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus, DBLP), o carte [D21] publicată în CRC Press și un capitol de carte [D22] publicat în Springer. Factorul de impact cumulat al lucrărilor publicate conform 2020 Journal Citation Reports (JCR) publicat de *Clarivate Analytics* în 2021 = 8.112. Revistele cu factor de impact ridicat în care au fost publicate lucrările sunt: *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 și 30<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2021.

**Etapa a 3-a** - 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)*. Rezolvarea problemelor legate de managementul proiectului.

**Principalele obiective** urmărite în cadrul celei de-a 3-a etape ce s-a desfășurat în perioada 01.01.2022 – 16.08.2022 au fost realizate conform planului de activitate și sunt grupate în

- **Activitatea 2.2** - Propunerea unui nou mecanism pentru garantarea stabilității SRA cu regulatoare neliniare de tip data-driven utilizând metode diferite de stabilitate.

- **Activitatea 2.3** - Implementarea, testarea, verificarea și validarea reguletoarelor neliniare bazate pe data-driven prin simulări și rezultate experimentale pe echipamente de laborator în legătură cu SMA.

- **Activitatea 3.1** Implementarea și testarea reguletoarelor de tip data-driven propuse folosind modele matematice care simulează comportamentul proceselor disponibile pentru partenerii noștri din industrie.

- **Activitatea 3.2** Validarea reguletoarelor propuse către partenerii noștri externi.

- **Activitatea 4.1** 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)).

- **Activitatea 4.2** Valorificarea rezultatelor prin participarea cu lucrare la o conferință internațională de specialitate cu vizibilitate ridicată, indexată 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).

- **Activitatea 4.3** Îmbunătățirea continuă a parteneriatelor internaționale cu noi parteneri.

- **Activitatea 4.4** Continuarea colaborării cu partenerii industriali menționați anterior.

- **Activitatea 5.1** Realizarea unei analize SWOT a calității muncii împreună cu mentorul. Rezolvarea punctelor slabe și a amenințărilor identificate.

- **Activitatea 5.2** 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.

- **Activitatea 5.3** Pregătirea rapoartelor pentru documentarea activităților.

Activitatea 2.2 continuată din cea de-a doua etapă a presupus studiul și validarea unui mecanism pentru garantarea stabilității SRA cu reguletoare neliniare de tip data-driven utilizând metode diferite de stabilitate. Activitatea 2.3 începută din etapa a doua a presupus implementarea, testarea, verificarea și validarea reguletoarelor neliniare bazate pe data-driven prin simulări și rezultate experimentale pe standul de laborator de tip SMA, dar și pe echipamente de laborator în legătură cu SMA. Detaliile sunt prezentate în cadrul secțiunii B, iar rezultatele au fost valorificate prin lucrări științifice de conferință și revistă care au fost acceptate spre publicare și urmează a fi indexate în *Clarivate Analytics Web of Science*, iar celelalte lucrări transmise se află în faza de recenzie.

Activitățile 3.1 și 3.2 au presupus Implementarea și testarea reguletoarelor de tip data-driven propuse folosind modele matematice care simulează comportamentul proceselor disponibile pentru partenerii noștri din industrie și validarea reguletoarelor amintite anterior către partenerii noștri externi. Această activitate a fost și va fi în continuare îndeplinită de către partenerii noștri externi, coautori în majoritatea lucrărilor științifice de conferință și revistă care au fost acceptate spre publicare și urmează a fi indexate în *Clarivate Analytics Web of Science*, iar celelalte lucrări transmise se află în faza de recenzie, detaliile fiind prezentate în cadrul secțiunii B.

Similar primelor două etape, activitățile 4.1, 4.2, 4.3 și 4.4 au presupus diseminarea și valorificarea rezultatelor publicarea acestora cu lucrare la conferințe internaționale de specialitate cu vizibilitate ridicată, indexate în Clarivate Analytics Web of Science și prin publicarea acestora într-una din revistele de top din domeniu clasificate în zona roșie (Q1) sau zona galbenă (Q2). Prin publicarea lucrărilor în reviste de top indexate în Clarivate Analytics Web of Science a fost asigurată continuarea colaborării cu partenerii industriali, iar în cadrul conferințelor internaționale de specialitate cu vizibilitate ridicată au fost stabilite noi posibile parteneriate internaționale cu parteneri din mediile academice și industriale.

La fel ca și în cadrul primelor două etape, activitățile 5.1, 5.2 și 5.2 au presupus rezolvarea punctelor slabe și a amenințărilor prin realizarea unei analize SWOT a calității muncii împreună cu mentorul, asigurarea managementului extern al proiectului prin colaborarea cu alte echipe de cercetare din domeniul de cercetare bazat pe reglare și pregătirea rapoartelor pentru documentarea activităților.

Livrabilele proiectului pentru anul **2022** sunt un raport de cercetare, 11 lucrări publicate și indexate în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge) [D1]–[D11], din care patru lucrări [D6]–[D9] publicate în reviste indexate în Clarivate Analytics Web of Science cu factor de impact, șapte lucrări [D14]–[D20] publicate, prezentate sau acceptate în volumele de conferință indexate în baze de date internaționale (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus, DBLP). Factorul de impact cumulat al lucrărilor publicate conform 2021 Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2022 = 23.723. Revistele cu factor de impact ridicat în care au fost publicate lucrările sunt: Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, International Journal of Computers Communications & Control, Information Sciences. Conferințe cu vizibilitate ridicată în volumele cărora au fost publicate lucrările: 1st IFAC Workshop on Control of Complex Systems, 6th IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2022 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2022 9th International Conference on Computers Communications and Control, 6th IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences, Procedia Computer Science.

Livrabilele proiectului pentru anii **2020**, **2021** și **2022** sunt un raport de cercetare, 22 lucrări publicate [D1]–[D22], din care nouă lucrări [D1]–[D9] publicate în reviste indexate în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge) cu factor de impact, 11 lucrări [D10]–[D20] publicate, prezentate sau acceptate în volumele de conferință indexate în baze de date internaționale (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus, DBLP), o carte [D21] publicată în CRC Press și un capitol de carte [D22] publicat în Springer. Factorul de impact cumulat al lucrărilor publicate conform 2021 Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2022 = 34.5610.

#### Remarci:

- Studiul bibliografic menționat în secțiunea B este detaliat în secțiunea C, iar rezultatele obținute pe parcursul anilor 2020, 2021 și 2022 sunt detaliate în secțiunea D.
- Lucrările științifice publicate conțin atât rezultate de simulare cât și experimente, validările au fost realizate pe standurile de laborator de tip aliajele cu memoria formei (engl. shape memory alloy – SMA) din Fig. 1, dar și pe echipamente de laborator cu elemente de execuție bazate pe SMA Fig. 2 (a) echipamentul de laborator de tip macara turn, b) echipamentul de laborator de tip macara 3D, c) echipamentul de laborator de tip sistem aerodinamic cu două rotoare, d) echipamentul de laborator de tip sistem de acționare electrică în curent continuu, e) echipamentul de laborator de tip servo și f) modelul de simulare de tip ambreiaj; acestea sunt detaliate în cadrul secțiunii D.

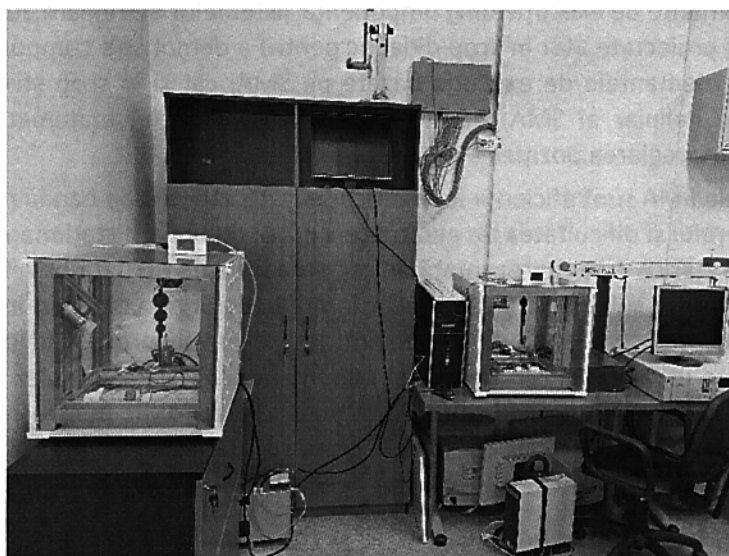


Fig. 1 Standurile de laborator de tip aliajele cu memoria formei (engl. shape memory alloy – SMA).

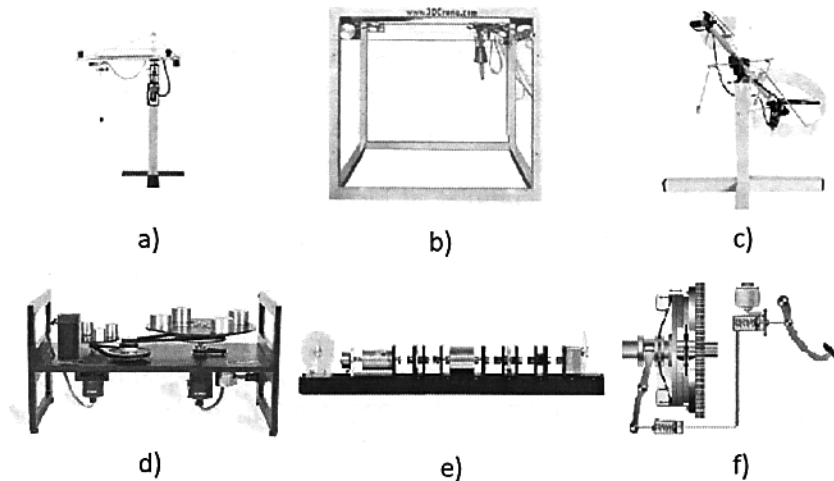


Fig. 2 Echipamentele de laborator cu elemente de execuție bazate pe SMA.

- Inițial în cadrul acestui proiect s-a pornit de la un singur stand de laborator, dar pe parcursul proiectului au fost achiziționate diverse piese și componente care au dus la dezvoltarea și îmbunătățirea primului stand de laborator de tip aliaje cu memoria formei și realizarea celui de-al doilea stand conform Fig. 1.
  - 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**

Anul **2020** a presupus analiza cercetării teoretice actuale și studierea aplicațiilor experimentale ale reguletoarelor neliniare propuse bazate pe reglatoarele de tip data-driven și cercetarea posibilităților de îmbunătățire a soluțiilor moderne de reglare și proiectarea de noi reglatoare neliniare bazate pe reglatoarele de tip data-driven. Această analiză a dus inevitabil la implementarea, testarea și validarea prin intermediul experimentelor a algoritmilor data-driven pe echipamentele de laborator cu elemente de execuție bazate pe SMA [D1], [D10] și [D11].

*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 [D20] 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 [D21] 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 [D3] 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 [D5] a fost folosită pentru identificarea modelului matematic al echipamentului de laborator de tip macara turn cu elemente de execuție bazate pe SMA, iar în [D13] tehnica de identificare Tensor Product a fost folosită pentru identificarea modelului matematic al echipamentului de laborator de tip sistem servo cu elemente de execuție bazate pe SMA; conform [D2], [D4], [D12] și [D2] tehnicile fuzzy sunt folosite cu brio pentru echipamentele de laborator de tip sistem servo [D2], [D4], sistem de ambreaj acționat electromagnetic [D12] și roboți mobili [D22], echipamente cu elemente de execuție bazate pe SMA.

Lucrarea [D20] 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.

- *Algoritmul data-driven IFT*

Problema de optimizare cu funcția obiectiv utilizată ca criteriu pătratic în algoritmi IFT este [22], [23], [D20], [D21]:

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

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], [D20], [D21]:

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

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 impartiiale 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  $r_F(k)$  [D20], [D21]:

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

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], [D20], [D21]:

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

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

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 [D20], [D21] :

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

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], [D20], [D21]:

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

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 Hessianei lui  $J$ , care în continuare va fi considerată ca fiind matrice identitate [D20].

Pe baza părții teoretice enunțate mai sus sunt formulate următoarele etape de proiectare a SRA cu algoritm IFT [D20], [D21]:

**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 funcția 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 algoritm IFT în cazul Single Input-Single Output (SISO) este prezentată în Fig. 3.



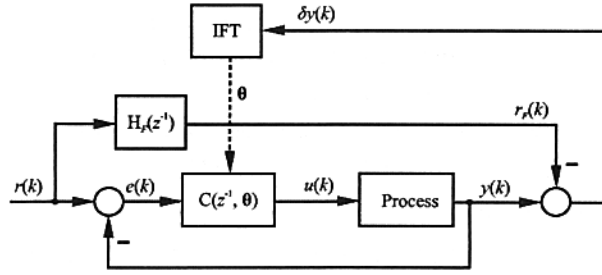


Fig. 3. Schema bloc a SRA cu algoritm IFT.

- *Echipamentul de laborator de tip macara turn*

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], [D20], [D21]:

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

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], [D20], [D21]:

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

$t \in \mathbf{R}, t \geq 0$  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 [D20], [D21].

- *Rezultate experimentale*

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  $H_{F3}(s) = \frac{0.03278}{1-0.9672z^{-1}}$ , acestea sunt ilustrate cu linie neagră continuă în Fig. 4, 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 [D20], [D21].

Parametrii inițiali ai reglatoarelor PI se obțin după aplicarea criteriului optimului simetric extins [26], [27] obținând [D20]:

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

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 [D20]:

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

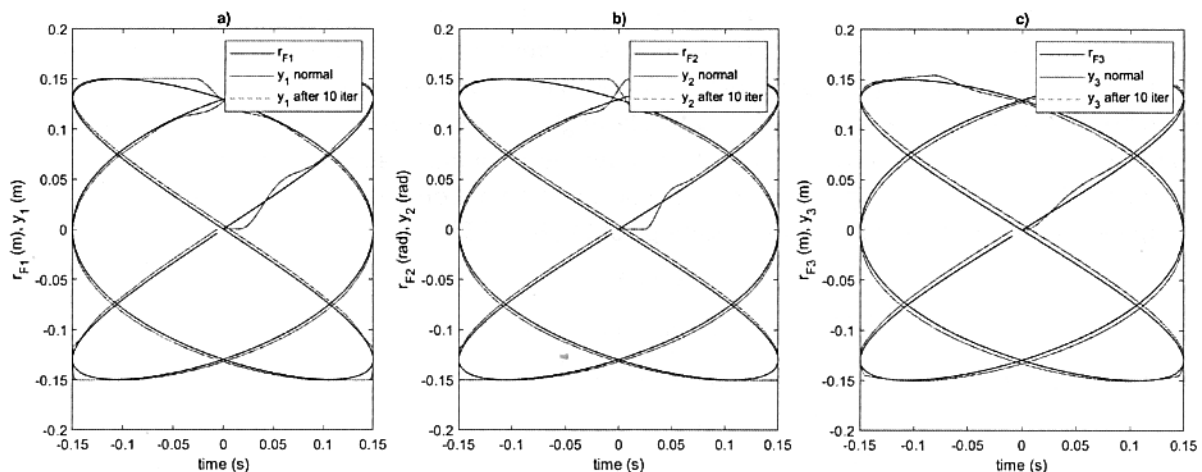


Fig. 4. Rezultatele experimentale ale experimentului inițial și după 10 iterații după aplicarea algoritmilor IFT. Condițiile inițiale și tranzitorii sunt clar conturate [D20].

Evoluțiile funcțiilor obiectiv din relația (1) după zece iterații sunt prezentate în Fig. 5: 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

algoritmii data-driven IFT sunt prezentate în Fig. 5 după cum urmează: în a) pentru poziția căruciorului, în b) pentru poziția unghiulară a brațului macaralei și în c) pentru poziția greutății macaralei [D20].

Conform celor din Fig. 5, funcția obiectiv converge lent pentru toate sistemele de reglare automată și conform Fig. 4, 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 [D20].

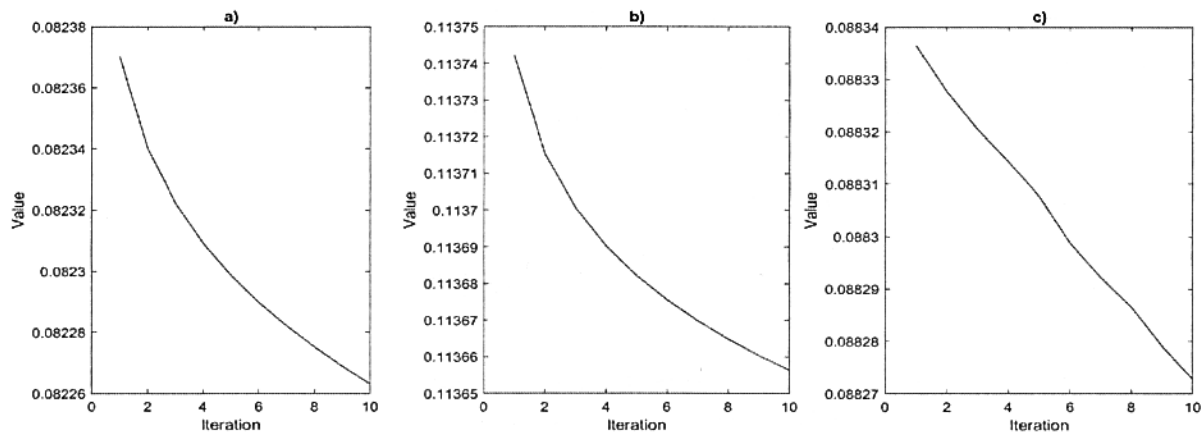


Fig. 5. Evoluțiile funcțiilor obiectiv după zece iterații [D20].

În lucrarea [D20] 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 [D20] 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 ai căror parametri au fost determinați folosind criteriul optimului simetric extins.

Realizările din linie ianuarie – august din anul 2022 din punct de vedere al cercetării au presupus validarea prin intermediul experimentelor pe standul de laborator de tip SMA a algoritmilor de tip data-driven și compararea rezultatelor obținute. Conform [D14] și [D15] algoritmii de tip data-driven Active Disturbance Rejection Control (ADRC), Model-Free Adaptive Control (MFAC), Model-Free Control (MFC), Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) și Iterative Feedback Tuning (IFT) au fost validați prin experimente pe echipamentul de laborator de tip SMA. Studiul comparativ între ADRC, MFAC și MFC a fost realizat în [D15], iar studiul comparativ dintre VRFT și IFT a fost realizat în [D5]. Scopul studiului comparativ a fost acela de a determina care sunt avantajele și dezavantajele utilizării algoritmilor de tip data-driven amintiți mai sus pe standul de laborator de tip SMA. Parametrii algoritmilor de tip data-driven au fost determinați optimal rezolvând o problemă de optimizare prin intermediul unor algoritmi metaeuristici precum Grey Wolf Optimizer (GWO) și African Vultures Optimization Algorithm (AVOA). Pentru a avea un studiu comparativ corect, două studii de caz au fost propuse, fără și cu aplicarea unui set de perturbații aditive aplicate la ieșirea procesului.

- *Algoritmul data-driven ADRC*

Algoritmul data-driven ADRC de ordinul al doilea este proiectat pornind de la procesul de tip Single Input-Single Output (SISO) [D15], [12], [14], [15], [28]-[30]

$$\tau^2 \ddot{y}(t_c) + 2\omega\tau \dot{y}(t_c) + y(t_c) = k u(t_c) + \eta(t_c), \quad (14)$$

unde  $t_c$  este indicele pentru timp continuu,  $\tau \in \mathfrak{R}$  este perioada naturală de oscilație a procesului,  $y(t_c) \in \mathfrak{R}$  este ieșirea reglată a procesului,  $\omega \in \mathfrak{R}$  este factorul de amortizare a procesului,  $u(t_c) \in \mathfrak{R}$  este intrarea (comanda) procesului,  $k \in \mathfrak{R}$  este un parametru al procesului, iar  $\eta(t_c) \in \mathfrak{R}$  reunește dinamica și perturbațiile nemodelate ale procesului și dinamica necunoscută. Notațiile introduse sunt  $a = k/\tau^2$  și  $a = a_0 + \Delta a$  în care parametrii  $a_0 \in \mathfrak{R}$  și  $\Delta a \in \mathfrak{R}$  sunt estimata cunoscută și eroarea de modelare necunoscută, iar modelul procesului din relația (14) devine

$$\ddot{y}(t_c) = -2\omega \dot{y}(t_c)/\tau - y(t_c)/\tau^2 + \eta(t_c)/\tau^2 + a_0 u(t_c) + \Delta a u(t_c). \quad (15)$$

Expresia termenului perturbator  $f(t) \in \mathfrak{R}$  constă în perturbari necunoscute extrase din relația (15) este

$$f(t_c) = -2\omega \dot{y}(t_c)/\tau - y(t_c)/\tau^2 + \eta(t_c)/\tau^2 + \Delta a u(t_c), \quad (16)$$

după înlocuirea termenului perturbator în ecuația procesului SISO clasic din relația (14), se obține un proces dublu integrator perturbat [D15], [12], [14], [15], [28]-[30]

$$\ddot{y}(t_c) = a_0 u(t_c) + f(t_c). \quad (17)$$

Având în vedere relația (17), ce reprezintă modelul dublu integrator de stare perturbat care este determinat luând în considerare că  $x_1(t_c) = y(t_c)$ ,  $x_2(t_c) = \dot{y}(t_c)$  și  $x_3(t_c) = f(t_c)$  sunt variabilele de stare (*engl. extended Luenberger state observer – ELSO*) este implementat pentru a estima valoarea termenului perturbator considerând  $u(t_c) \in \mathfrak{R}$  intrarea (comanda) procesului și  $y(t_c) \in \mathfrak{R}$  ieșirea reglată a procesului ca fiind intrări. Ieșirile ELSO  $\hat{x}_1(t_c)$ ,  $\hat{x}_2(t_c)$  și  $\hat{x}_3(t_c)$  sunt folosite pentru a estima  $y(t_c)$ ,  $\dot{y}(t_c)$  și  $f(t_c)$ . Estimata variabilelor de stare este determinată folosind  $\mathbf{L} = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T \in \mathfrak{R}^3$  ca parametru al observatorului. După realizarea înlocuirilor, modelul dinamic al ELSO devine [D15], [12], [14], [15], [28]-[30]

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t_c) \\ \dot{\hat{x}}_2(t_c) \\ \dot{\hat{x}}_3(t_c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t_c) \\ \hat{x}_2(t_c) \\ \hat{x}_3(t_c) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t_c) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{f}(t_c), \quad (18)$$

$$y(t_c) = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t_c) \\ \hat{x}_2(t_c) \\ \hat{x}_3(t_c) \end{bmatrix},$$

în care indicele superior  $T$  reprezintă transpusa matricei.

În cele ce urmează este implementat un observator pe stare de tip Luenberger (*engl. extended Luenberger state observer – ELSO*) pentru a estima valoarea termenului perturbator considerând  $u(t_c) \in \mathfrak{R}$  intrarea (comanda) procesului și  $y(t_c) \in \mathfrak{R}$  ieșirea reglată a procesului ca fiind intrări. Ieșirile ELSO  $\hat{x}_1(t_c)$ ,  $\hat{x}_2(t_c)$  și  $\hat{x}_3(t_c)$  sunt folosite pentru a estima  $y(t_c)$ ,  $\dot{y}(t_c)$  și  $f(t_c)$ . Estimata variabilelor de stare este determinată folosind  $\mathbf{L} = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T \in \mathfrak{R}^3$  ca parametru al observatorului. După realizarea înlocuirilor, modelul dinamic al ELSO devine [D15], [12], [14], [15], [28]-[30]

$$\begin{bmatrix} \hat{\dot{x}}_1(t_c) \\ \hat{\dot{x}}_2(t_c) \\ \hat{\dot{x}}_3(t_c) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_c} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t_c) \\ \hat{x}_2(t_c) \\ \hat{x}_3(t_c) \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{x}}(t_c)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ a_0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_c} u(t_c) + \underbrace{\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix}}_{\mathbf{L}} (y(t_c) - \hat{y}(t_c)) \quad (19)$$

$$\hat{y}(t_c) = \underbrace{[1 \ 0 \ 0]}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t_c) \\ \hat{x}_2(t_c) \\ \hat{x}_3(t_c) \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{x}}(t_c)}$$

ELSO în timp discret este obținut după aplicarea discretizării de tip zero-order hold [D15], [12], [14], [15], [28]-[30]

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t_d + 1) \\ \hat{x}_2(t_d + 1) \\ \hat{x}_3(t_d + 1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1-l_1 & T_s & 0.5T_s^2 \\ -l_2 & 1 & T_s \\ -l_3 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_d} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t_d) \\ \hat{x}_2(t_d) \\ \hat{x}_3(t_d) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0.5b_0T_s^2 & l_1 \\ a_0T_s & l_2 \\ 0 & l_3 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_d} \begin{bmatrix} u(t_d) \\ y(t_d) \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\hat{y}(t_d) = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t_d) \\ \hat{x}_2(t_d) \\ \hat{x}_3(t_d) \end{bmatrix},$$

în care  $t_d$  este indicele pentru timp discret, iar  $T_s$  este perioada de eșantionare. Legea de reglare în timp discret aferentă algoritmului data-driven ADRC este [D15], [12], [14], [15], [28]-[30]

$$u(t_d) = K_1 \underbrace{(y^*(t_d) - \hat{x}_1(t_d))}_{\hat{e}(t_d)} + K_2 \underbrace{(\Delta y^*(t_d) - \hat{x}_2(t_d))}_{\Delta \hat{e}(t_d)} - \hat{x}_3(t_d) / a_0 = K_1 \hat{e}(t_d) + K_2 \Delta \hat{e}(t_d) - \hat{x}_3(t_d) / a_0, \quad (21)$$

care poate fi considerată ca un regulator PD modificat, în care parametrii  $K_1$  and  $K_2$  ai legii de reglare ADRC sunt determinați conform [D6], [12], [14], [15], [22]-[24],  $y^*(t_d)$  este vectorul referințelor ce este aplicat sistemului de reglare automată,  $\Delta \hat{e}(t_d) = \hat{e}(t_d) - \hat{e}(t_d - 1)$  este incrementul estimatei erorii de urmărire, iar  $\Delta y^*(t_d) = y^*(t_d) - y^*(t_d - 1)$  este incrementul traiectoriei de referință [D15], [12], [14], [15], [28]-[30].

Conform [D15], [30] și [31] stabilitatea sistemului de reglare automată cu regulatorul data-driven ADRC de ordinul al doilea este garantată dacă o funcție Lyapunov există astfel încât este îndeplinită o inegalitate, în care derivatele parțiale ale funcției Lyapunov sunt mai mici decât un parametru selectat de către proiectant. După aceea, o altă inegalitate este satisfăcută dacă o perturbație este folosită, atunci sistemul perturbat va rămâne asimptotic stabil.

Schema bloc a sistemului de reglare automată cu regulator data-driven ADRC de ordinul al doilea este prezentată în Fig. 6.

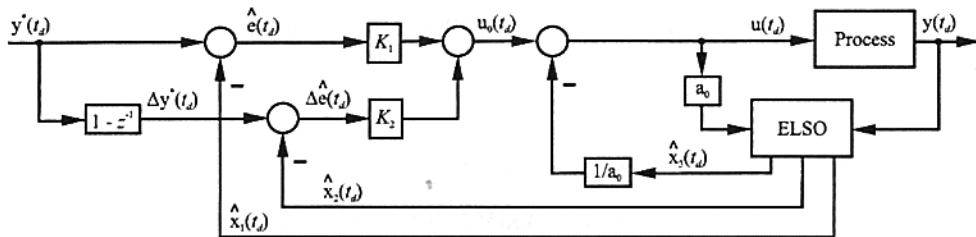


Fig. 6. Schema bloc a sistemului de reglare automată cu regulator data-driven ADRC de ordinul al doilea [D15].

- *Algoritmul data-driven MFAC*

Cea mai utilizată variantă a algoritmului data-driven MFAC este Compact Form Dynamic Linearization (CFDL), conform [D15], [32]-[35], algoritmul data-driven MFAC este dezvoltat pornind de la modelul neliniar al procesului în timp discret

$$y(t_d + 1) = f(y(t_d), \dots, y(t_d - \eta_y), u(t_d), \dots, u(t_d - \eta_u)), \quad (22)$$

în care  $y(t_d) \in \mathfrak{R}$  și  $u(t_d) \in \mathfrak{R}$  au aceeași semnificație ca și în cazul precedent,  $f: \mathfrak{R}^{n_y + n_u + 2} \rightarrow \mathfrak{R}$  este o funcție neliniară vectorială de variabilă vectorială; funcția  $f$  este necunoscută, în care derivatele sale parțiale în raport cu intrarea (comanda) se presupun a fi continue, indicii superiori  $n_y$  and  $n_u$  sunt ordinele necunoscute ale procesului [D15], [32]-[35].

Algoritmul data-driven MFAC se concentrează pe  $\Phi$ , un element scalar cunoscut sub denumirea de derivată pseudoparțială (Pseudo-Partial Derivative, PPD) care există astfel încât modelul procesului neliniar în timp discret din relația (22) să poată fi utilizat pentru a obține următorul model al algoritmului MFAC [D15], [32]-[35]

$$\Delta y(t_d + 1) = \Phi(t_d) \Delta u(t_d), \quad (23)$$

considerând că modelul procesului neliniar în timp discret din relația (22) este generalizat în sens Lipschitz, adică  $\|\Delta y(t_d + 1)\| \leq b \|\Delta u(t_d)\|$  pentru fiecare  $t_d$  fix, și  $\|\Delta u(t_d)\| \neq 0$ , considerând că  $|\Phi(t_d)| \leq b$ ,  $\Delta y(t_d + 1) = y(t_d + 1) - y(t_d)$ ,  $\Delta u(t_d) = u(t_d) - u(t_d - 1)$ , și  $b = \text{const} > 0$  [D15], [32]-[35].

Obiectivul versiunii CFDL a algoritmului MFAC este de a rezolva problema de optimizare

$$u^*(t_d) = \arg \min_{u(t_d)} J_{MFAC}(u(t_d)), \quad J_{MFAC}(u(t_d)) = [y^*(t_d + 1) - y(t_d + 1)]^2 + \lambda (\Delta u(t_d))^2, \quad (24)$$

în care  $y^*(t_d + 1)$  este vectorul referințelor și  $\lambda \geq 0$  este un coeficient de ponderare utilizat în proiectare. Stabilitatea este garantată dacă elementul PPD este diagonal dominant astfel încât

$$|\Phi(t_d)| \leq b_1, \quad b_2 \leq |\Phi(t_d)| \leq a b_2, \quad a \geq 1, \quad b_2 > b_1(2a + 1), \quad (25)$$

iar estimata PPD este calculată utilizând datele I/O la fiecare moment de timp din procesul condus. Valorile alese de proiectant pentru parametrii  $b_1$ ,  $b_2$  și  $a$  au rolul de limită inferioară și superioară pentru elementul PPD, al cărui semn ar trebui să fie în continuare același. Estimata necunoscută a elementului PPD este determinată folosind [D15], [32]-[35]

$$\hat{\Phi}(t_d) = \hat{\Phi}(t_d - 1) + \frac{\eta [\Delta y(t_d) - \hat{\Phi}(t_d - 1) \Delta u(t_d - 1)] \Delta u(t_d - 1)}{\mu + (\Delta u(t_d - 1))^2}, \quad (26)$$

în care  $\mu > 0$  este un coeficient pondere, iar  $\eta \in (0, 1)$  este un parametru constant, ambii parametri fiind aleși de către proiectant. Stabilitatea sistemului de reglare automată cu regulator data-driven MFAC este garantată prin îndeplinirea celorlalte condiții de stabilitate [D15], [32]-[35]

$$\hat{\Phi}(t_d) = \hat{\Phi}(1), \text{ if } |\hat{\Phi}(t_d)| < b_2 \text{ or } |\hat{\Phi}(t_d)| > a b_2 \text{ sau } \text{sgn}(\hat{\Phi}(t_d)) \neq \text{sgn}(\hat{\Phi}(1)), \quad \hat{\Phi}(t_d) = \hat{\Phi}(1), \quad (27)$$

if  $|\hat{\Phi}(t_d)| > b_1$  sau  $\text{sgn}(\hat{\Phi}(t_d)) \neq \text{sgn}(\hat{\Phi}(1))$ ,

în care  $\hat{\Phi}(1)$  este un parametru ales de către proiectant și este valoarea inițială a elementului PPD. Legea de reglare a algoritmului data-driven MFAC este obținută prin înlocuirea ieșirii reglate  $y(t_d + 1) = y(t_d) + \Phi(t_d) \Delta u(t_d)$  în problema de optimizare din relația (11) rezultând că [D15], [32]-[35]

$$u(t_d) = u(t_d - 1) + \frac{\rho \hat{\Phi}(t_d) [y^*(t_d + 1) - y(t_d)]}{\lambda + (\hat{\Phi}(t_d))^2}, \quad (28)$$

în care  $\rho > 0$  este o constantă aleasă de către proiectant.

Schema bloc a sistemului de reglare automată cu regulator data-driven MFAC este prezentată în Fig. 7.

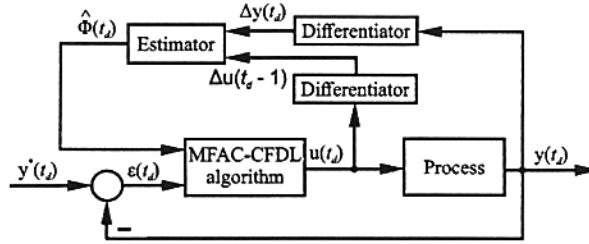


Fig. 7. Schema bloc a sistemului de reglare automată cu regulator data-driven MFAC [D15].

- Algoritmul data-driven MFC

Algoritmul data-driven MFC de ordinul al doilea este cunoscut în literatura de specialitate ca și regulator inteligent PID (iPID). Varianta de ordinul al doilea a algoritmului MFC este proiectată pornind de la modelul nelinier al procesului condus [D1], [D15], [12], [36], [37]

$$y(t_d) = 2y(t_d - 1) - y(t_d - 2) + \alpha u(t_d - 1) + F(t_d - 1), \quad (29)$$

care este rezultatul unei forme aproximative de discretizate Euler a modelului procesului necunoscut de ordinul al doilea în timp continuu [D1], [D15], [12], [36], [37]

$$\ddot{y}(t) = \alpha u(t) + F(t), \quad (30)$$

în care  $y(t_d) \in \mathfrak{R}$  și  $u(t_d) \in \mathfrak{R}$  au aceeași semnificație ca și în cazul precedent,  $F(t_d) \in \mathfrak{R}$  joacă rol de perturbație, este rezultat din datele de intrare/ieșire, este actualizat continuu la fiecare moment de timp, include părțile necunoscute ale modelului procesului și eventuale perturbații, iar  $\alpha \in \mathfrak{R}$  este un parametru constant ales de către proiectantul sistemului de reglare automată astfel încât  $y(t_d) - 2y(t_d - 1) + y(t_d - 2)$  și  $\alpha u(t_d)$  să aibă același ordin de mărime [D1], [D15], [12], [36], [37].

Legea de reglare aferentă algoritmului data-driven MFC, cunoscut în literatura de specialitate ca și regulator iPID este

$$u(t_d) = \alpha^{-1} (-\hat{F}(t_d) + y^*(t_d + 1) - 2y^*(t_d) + y^*(t_d - 1) - P_1 e(t_d) - P_2 e(t_d - 1) - P_3 e(t_d - 2)), \quad (31)$$

în care componenta PID este evidențiată prin parametrii  $P_1, P_2, P_3 \in \mathfrak{R}$  ai legii reglare a algoritmului data-driven MFC și prin erorile de urmărire  $e(t_d), e(t_d - 1), e(t_d - 2) \in \mathfrak{R}$  [D1], [D15], [12], [36], [37]

$$\hat{F}(t_d) = y(t_d) - 2y(t_d - 1) + y(t_d - 2) - \alpha u(t_d - 1). \quad (32)$$

Parametrul  $\delta(t_d) \in \mathfrak{R}$  reprezintă eroarea de estimare, o perturbație neglijabilă care apare aleatoriu, care se presupune a fi nulă și se calculează ca fiind diferența dintre  $F(t_d)$  și  $\hat{F}(t_d)$  [D1], [D15], [12], [36], [37]

$$\delta(t_d) = F(t_d) - \hat{F}(t_d) \approx 0. \quad (33)$$

Dinamica ecuațiilor a sistemului de reglare automată în buclă închisă cu regulator data-driven MFC este

$$y(t_d) = 2y(t_d - 1) - y(t_d - 2) - \hat{F}(t_d - 1) + y^*(t_d) - 2y^*(t_d - 1) + y^*(t_d - 2) - P_1 e(t_d - 1) - P_2 e(t_d - 2) - P_3 e(t_d - 3) + F(t_d - 1). \quad (34)$$

Relația de mai sus este obținută prin înlocuirea lui  $u(t_d - 1)$  din relația (31) în relația (29).

Sistemul de reglare automată cu algoritmul data-driven MFC este stabil dacă rădăcinile polinomului caracteristic [D1], [D15], [12], [36], [37]

$$e(t_d) + (-2 - P_1)e(t_d - 1) + (1 - P_2)e(t_d - 2) - P_3 e(t_d - 3) - \delta(t_d - 1) = 0, \quad (35)$$

sunt situate în interiorul discului centrat în origine de rază 1. Relația (35) este rezultatul înlocuirii lui  $\delta(t_d)$  din relația (33) în dinamica ecuației sistemului de reglare automată cu algoritmul MFC din relația (34) și presupunând că norma lui  $\delta(t_d)$  este mărginită, iar  $\|\delta(t_d)\| < \delta_{\max}$  și limita superioară  $\delta_{\max}$  este de valoare foarte mică. Această ipoteză este restrictivă întrucât corespunde efectiv absenței

dinamicii nemodelate și problema se reduce la reglarea unui sistem de ordinul al doilea, în comparație cu relația (29) în care  $F(t_d - 1)$  este anulat de către  $\hat{F}(t_d)$  [D1], [D15], [12], [36], [37].

Schema bloc a sistemului de reglare automată cu regulator data-driven MFC este prezentată în Fig. 8.

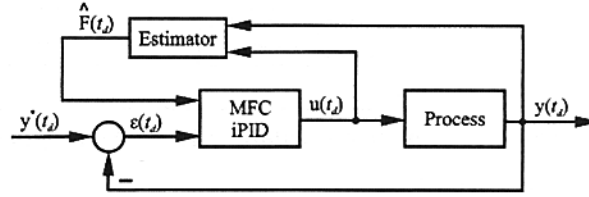


Fig. 8. Schema bloc a sistemului de reglare automată cu regulator data-driven MFC [D15].

- Algoritmul data-driven VRFT

În cazul algoritmului data-driven VRFT va fi considerat regulatorul PI în timp discret cu funcția de transfer

$$C(z^{-1}, \varphi) = \frac{\phi_1 + \phi_2 z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (36)$$

cu vectorul de parametri  $\varphi = [\phi_1 \ \phi_2]$  [D14], [15].

Algoritmul data-driven VRFT folosește un set date de intrare/ieșire (I/O)  $\{u(t_d), y(t_d)\}$ . Setul de date de I/O este obținut după un experiment inițial în buclă deschisă cu scopul de a determina parametrii regulatorului PI în timp discret din relația (36) [D14], [15].

În mod normal algoritmul data-driven VRFT un semnal cu o gamă largă de frecvențe este aplicat ca și intrare a procesului nelinier stabil. Modelul de referință este urmărit prin intermediul funcției obiectiv

$$J_{MR}(\varphi) = \sum_{t_d=1}^N \|y_{\varphi}(t_d) - y_d(t_d)\|^2, \quad (37)$$

în care  $\varphi \in \mathfrak{R}^{n_c}$  este vectorul parametrilor regulatorului VRFT,  $y_d(t_d)$  este vectorul ieșirilor procesului nelinier care este obținut considerându-l  $H_F$  un model ales de către proiectant, care de asemenea poate fi considerat o funcție neliniară  $H_F : \mathfrak{R}^{n_{uF} + n_{yF} + 2} \rightarrow \mathfrak{R}$  de forma [D14], [15].

$$y_d(t_d) = H_F(y_d(t_d - 1), \dots, y_d(t_d - n_{yF}), r(t_d - 1), \dots, r(t_d - n_{uF})), \quad (38)$$

iar  $r(t_d)$  este referința aplicată sistemului de reglare automată [D14], [15].

Ieșirea  $y_{\varphi}(t_d + 1)$  se obține din modelul local

$$y_{\varphi}(t_d + 1) = f(y_{\varphi}(t_d), \dots, y_{\varphi}(t_d - n_y), u_{\varphi}(t_d), \dots, u_{\varphi}(t_d - n_u)), \quad (39)$$

în care  $f : \mathfrak{R}^{n_u + n_y + 2} \rightarrow \mathfrak{R}$  este o funcție neliniară necunoscută,  $u_{\varphi}(t_d) \in \mathfrak{R}^n$  este intrarea (comanda) care este generată ca ieșire a regulatorului VRFT [D14], [15].

$$u_{\varphi}(t_d) = C_{\varphi}(\varphi, u_{\varphi}(t_d - 1), \dots, u_{\varphi}(t_d - n_{uc}), e(t_d), \dots, e(t_d - n_{ec})), \quad (40)$$

$uc$  și  $ec$  sunt ordinele maxime de întârziere, cunoscute, aferente comenzii și respectiv erorii de reglare  $e(t_d) \in \mathfrak{R}$ , iar  $C_{\varphi} : \mathfrak{R}^{n_{uc} + n_{ec} + 1 + n_{uc}} \rightarrow \mathfrak{R}$  este o funcție neliniară vectorială de variabilă vectorială [D14], [15]. Pentru a simplifica notația regulatorului VRFT, se particularizează prin a alege că  $uc = 1$  and  $ec = 0$

$$u_{\varphi}(t_d) = C_{\varphi}(\varphi, u_{\varphi}(t_d - 1), e(t_d)), \quad (41)$$

unde  $C_{\varphi} : \mathfrak{R}^{1 + n_c} \rightarrow \mathfrak{R}$ , and  $e(t_d) \in \mathfrak{R}$  sunt calculate după cum urmează [D14], [15].

$$e(t_d) = r(t_d) - y_{\varphi}(t_d), \quad (42)$$

în care  $r(t_d)$  este referința sistemului de reglare. Referința virtuală



$$\bar{r}(t_d) = H_F^{-1}(y(t_d)), \quad (43)$$

este calculată astfel încât ieșirea modelului de referință și ieșirea procesului în buclă închisă să aibă traiectorii similare. Rezultatul impunerii notației  $H_F^{-1}(y(t_d))$  este vectorul referințelor virtuale  $\bar{r}(t_d)$ , care este impus ca intrare a lui  $H_F$  și astfel rezultă  $y(t_d)$ . Prin urmare eroarea de reglare (eroarea de urmărire) virtuale este [D14], [15].

$$\bar{e}(t_d) = \bar{r}(t_d) - y(t_d). \quad (44)$$

Regulatorul VRFT funcționează cu vectorul intrărilor  $\bar{e}(t_d)$  și elaborează vectorul comenzilor  $u_\varphi(t_d)$  urmărind obiectivul de urmărire a modelului de referință. Vectorul  $\varphi$  se calculează în urma minimizării funcției obiectiv

$$J_{VRFT}(\varphi) = \frac{1}{N} \sum_{t_d=1}^N \|C_\varphi(\varphi, u_\varphi(t_d - 1), \bar{e}(t_d)) - u_\varphi(t_d)\|^2, \quad (45)$$

printr-un algoritm metaeuristic sau prin metoda celor mai mici pătrate [D14], [15].

Mecanismul VRFT ia în considerare folosirea unui filtru variant în timp

$$L(z^{-1}) = (1 - H_F(z^{-1}))H_F(z^{-1}), \quad (46)$$

astfel încât funcțiile obiectiv din relațiile (37) și (45) vor fi aproximativ egale, în care  $u_\varphi(t_d)$  și  $\bar{e}(t_d)$  sunt filtrați prin intermediul lui  $L(z^{-1})$  [D14], [15].

Schema bloc a sistemului de reglare automată cu regulator data-driven VRFT este prezentată în Fig. 9.

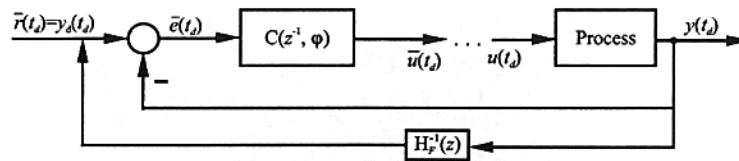


Fig. 9. Schema bloc a sistemului de reglare automată cu regulator data-driven VRFT [D14].

- *Algoritmul data-driven IFT*

În cazul algoritmului data-driven IFT, parametrii inițiali ai regulatorului PI sunt determinați prin intermediul unui algoritm metaeuristic pentru a demara experimentul inițial (normal), apoi algoritmul data-driven IFT îmbunătățește parametrii regulatorului PI într-un mod iterativ prin rezolvarea unei probleme de gradient. Detaliile referitoare algoritmului data-driven IFT sunt prezentate în cadrul realizărilor din anul 2021 din secțiunea B.

- *Standul de laborator de tip aliajele cu memoria formei*

Echipamentul de laborator de tip SMA constă dintr-un stand de laborator construit și dezvoltat intern conform Fig. 1 și 10. Modelul său matematic care a fost utilizat în determinarea parametrilor optimali ai reguletoarelor de tip data-driven amintiți mai sus a fost determinat folosind modelele fuzzy evolved Takagi-Sugeno-Kang [D3].

Echipamentul de laborator de tip SMA constă dintr-o sursă de alimentare (PS), un stand de laborator de testare de tip SMA (SMA-TS) și un calculator personal (PC). Comunicația dintre SMA-TS și PC este realizată prin echiparea unității PC cu un dispozitiv I/O multifuncțional de tip PCIe-6321 (I/O D) de tip PCI Express cu 16 AI (16-Bit, 250 kS/s), 2 AO (900 kS/s), 24 DIO, iar conexiunea și acestuia se realizează printr-un cablu de 68-Pin Shielded Connector Block (SCB) care gestionează conexiunile hardware către senzori (TS și DS) și comutatoarele electronice (ESM) [14], [15].

SMA-TS poate fi utilizat pentru mai multe scenarii de testare care implică o gamă vastă de dimensiuni și forme ale elementelor bazate pe actuatori SMA, care sunt vitale întrucât procesul are neliniarități, prin urmare, reglarea acestuia reprezintă o provocare pentru proiectanții din sfera reglării automate. SMA-TS este realizat din cadru de profil din aluminiu (APF), senzori, componente mecanice care îndeplinesc diverse implementări mecanice ale elementelor de acționare (AE) bazate

pe SMA și o interfață om-mașină (HMI). SMA-TS este alimentat printr-o sursă de alimentare proiectată intern care alimentează cinci circuite interne pentru a regla cel puțin un AE de fiecare. Scopul HMS este reglarea tensiunii de alimentare și a protecției limită de curent și poate fi folosit ca sistem de răcire pentru a evita situațiile neplăcute [14], [15].

Configurația scenariului de testare constă în următoarele: un circuit activ de conducere; tensiune de alimentare 0,25 V DC și limita de curent 13 A; limita PWM 15% și frecvența 10 kHz; răcire forțată externă; forța de sarcină (LF) în apropiere de 10 N; elementul de acționare (AE) este un fir cu memorie de formă NiTi - Nitinol: 300 mm lungime, 1,0 mm diametru și 80 °C fir de nitinol de tranziție de fază, deformare 2 - 5% / 6 - 15 mm cu aproximativ 3500 - 1000 g (34,3 - 9,81 N). Alte informații tehnice sunt: rezistivitate electrică austenită / martensită 3,13 - 2,9 mΩ, curent electric de alimentare  $2 \times I (0,3 \text{ s}) / 1,2 \times I (3 \text{ s}) / I = 6 \text{ A} \rightarrow \text{max. } 90 \text{ }^\circ\text{C}$ , timp de răcire de la 90 până la 45 °C este aproximativ 10 s la 20 °C temperatura camerei. La ambele capete, firul de acționare este fixat de o sertizare tip inel; o cameră de termoviziune (TVC) care este utilizată pentru calibrarea senzorului de temperatură al elementului de acționare (TS); un senzor de temperatură ambientală (ATS) care este un coeficient de temperatură pozitiv (PTC) cu termistor de sticlă PT106051, interval de temperatură -50 până la +500 °C, rezistență 100 Ω la 0 °C, eroare ±2%, curent maxim de lucru 1 mA, dimensiuni: 1,7 x 2,4 x 10 mm (de la 3,3 V DC în serie cu rezistor de 3,3 kΩ) [14], [15].

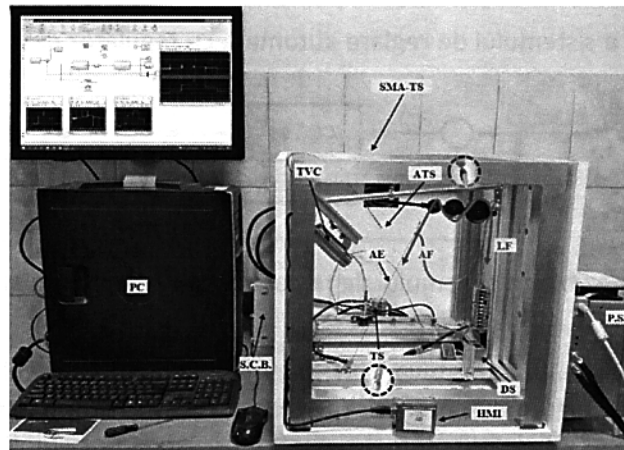


Fig. 10. Amenajarea experimentală a standului de laborator de tip SMA [D14], [D15].

- *Rezultate experimentale*

Pentru a determina care dintre algoritmi de tip data-driven performează cel mai bine, două studii de caz sunt propuse. În primul studiu de caz nu sunt aplicate perturbații aditive, iar în al doilea studiu de caz, următorul set de perturbații aditive au fost aplicate

$$d(t_d) = 0 \text{ if } t_d = (0 \dots 8) / T_s, -0.25 \text{ if } t_d = (8 \dots 23) / T_s, 0.25 \text{ if } t_d = (23 \dots 40) / T_s, \quad (47)$$

în care  $T_s = 0.01 \text{ s}$  este perioada de eșantionare, iar  $d(t_d)$  este perturbația aditivă ce este aplicată pe ieșirea standului de laborator de tip SMA [D14], [D15].

Cei cinci algoritmi de tip data-driven care au fost validați prin experimente pe standul de laborator de tip SMA sunt ADRC, MFAC, MFC, VRFT și IFT. Condițiile inițiale sunt considerate nule fără a afecta cazul general.

În continuare, sunt prezentate condițiile premergătoare proiectării algoritmilor. Semnalul de referință (ieșirea modelului de referință) pentru standul de laborator SMA este

$$y^*(t_d) = 0 \text{ if } t_d = (0 \dots 5) / T_s, 0.5 \text{ if } t_d = (5 \dots 12) / T_s, 2 \text{ if } t_d = (12 \dots 19) / T_s, 3 \text{ if } t_d = (19 \dots 26) / T_s, \quad (48)$$

$$1.5 \text{ if } t_d = (26 \dots 33) / T_s, 0.5 \text{ if } t_d = (33 \dots 40) / T_s.$$

Parametrii algoritmilor de tip data-driven ADRC, MFAC, MFC, CRT și IFT sunt obținuți prin rezolvarea problemei de optimizare [D14], [D15]

$$\Theta^{(0)*} = \arg \min_{\Theta} J_{e,u}(\Theta^{(0)}), J_{e,u}(\Theta^{(0)}) = \frac{1}{N} \sum_{t_d=1}^N [e^2(t_d, \Theta^{(0)})], \quad (49)$$

prin intermediul unui algoritm metaeuristic de optimizare, în care  $\Theta$  este vectorul parametrilor de acordare ai regulatorului,  $\diamond$  este un parametru care precizează tipul algoritmului data-driven,  $\diamond=1$  pentru algoritmul data-driven ADRC,  $\diamond=2$  pentru algoritmul data-driven MFAC,  $\diamond=3$  pentru algoritmul data-driven MFC,  $\diamond=4$  pentru algoritmul data-driven VRFT și  $\diamond=5$  pentru algoritmul data-driven IFT,  $N = 4000$  este numărul de eșantioane calculate prin împărțirea timpului alocat unui experiment la perioada de eșantionare [D14], [D15].

Parametrii acordabili ai algoritmilor data-driven sunt determinați optimal utilizând modelul matematic al standului de laborator de tip SMA determinat în [D3] prin intermediul modelelor de tip evolved Takagi-Sugeno-Kang fuzzy, semnalul de referință (ieșirea modelului de referință) din relația (48) minimizând funcția obiectiv din relația (49) printr-un algoritm de optimizare metaeuristic.

Parametrii ELSO ai algoritmului data-driven ADRC sunt obținuți în urma aplicării a trei semnale de tip chirp – semnale pseudo aleatorii binare pe intrarea standului de laborator de tip SMA în cadrul unui experiment în buclă deschisă pentru a obține ieșirea procesului care în cele din urmă să fie urmărită de ELSO. Condițiile inițiale a ELSO sunt  $[\hat{x}_1(0) \hat{x}_2(0) \hat{x}_3(0)]^T = [0.5 \ 0 \ 0]^T$ . Valorile proprii ce garantează stabilitatea și buna dinamică a observatorului sunt

$$\sigma(\mathbf{A}_c - \mathbf{L}\mathbf{C}) = \{-0.11 \ -0.24 \ -0.69\}, \quad (50)$$

iar parametrii matricei determinați prin metoda alocării poliilor sunt [D14], [D15]

$$\mathbf{L} = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T = [1.1440 \ 0.3242 \ 0.0242]^T. \quad (51)$$

Parametrii optimali ai algoritmului data-driven ADRC sunt [D14], [D15]

$$\Theta^{(1)} = [K_1 \ K_2 \ a_0]^T = [4.5 \ -0.8 \ 0.45]^T, \quad (52)$$

în care parametrii optimali din (52) sunt determinați aplicând criteriul de stabilitate din [30] și [31].

Parametrii optimali în cazul algoritmului data-driven MFAC în varianta CFDL sunt [D14], [D15]

$$\Theta^{(2)} = [\eta \ \lambda \ \mu \ \rho \ \hat{\phi}(1)]^T = [0.001 \ 0.45 \ 1.5 \ 0.5 \ 0.012]^T, \quad (53)$$

în care limita inferioară a matricei PPD este  $0.001\hat{\phi}(1)$  și limita inferioară a matricei PPD este  $1000\hat{\phi}(1)$ , limite folosite în garantarea stabilității algoritmului MFAC conform relațiilor (25) și (27).

Vectorul parametrilor optimali aferenți algoritmului MFC cunoscut ca și iPID este [D14], [D15]

$$\Theta^{(3)} = [P_1 \ P_2 \ P_3]^T = [-3.4 \ 0.6 \ 0.01]^T, \quad (54)$$

iar parametrii au fost determinați ținând seama de condițiile de stabilitate din relația (35), iar parametrul ales de către proiectant este  $\alpha=450$ .

În cazul algoritmului data-driven VRFT, parametrii optimali ai regulatorului PI din relația (36) sunt determinați folosind datele de I/O în urma unui experiment inițial în buclă deschisă, în care este aplicat un semnal pseudo aleator binar. Modelul de referință din cazul VRFT are funcția de transfer [D14], [D15]

$$H_F(z^{-1}) = \frac{0.04877 z^{-1}}{1 - 0.9512 z^{-1}}. \quad (55)$$

Alegerea modelului de referință este importantă în cazul algoritmului data-driven VRFT întrucât ieșirea modelului de referință și ieșirea procesului în buclă închisă trebuie să aibă în cele din urmă traiectorii aproape identice. Parametrii optimali ai algoritmului data-driven VRFT sunt obținuți în urma minimizării funcției obiectiv din relația (45) prin intermediul unui algoritm metaeuristic [D14], [D15]

$$\Theta^{(4)} = [\phi_1 \ \phi_2]^T = [1.4600 \ -1.0604]^T. \quad (56)$$

În cazul algoritmului data-driven IFT, parametrii optimali ai regulatorului PI din relația (36) sunt obținuți în urma unui mecanism iterativ. În primă fază algoritmul IFT necesită un set de

parametrii inițiali pentru regulatorul PI. În cazul de față parametrii inițiali ai regulatorului PI sunt determinați printr-un algoritm metaeuristic. În pasul următor parametrii optimați ai algoritmului data-driven IFT sunt determinați într-un mod iterativ în urma a zece experimente de gradient minimizând funcția obiectiv din relația (1) rezultând [D14], [D15]

$$\Theta^{(5)} = [\phi_1 \ \phi_2]^T = [1.6429 \ -1.1037]^T. \quad (57)$$

Rezultatele obținute în urma experimentelor în timp real sunt prezentate prin intermediul tabelului 1 și a Fig. 11 și 12. Rezultatele din tabel sunt rezultatul funcției obiectiv din relația (49) pentru ambele studii de caz.

Tabelul 1. Valorile funcțiilor obiectiv pentru cele două studii de caz [D14], [D15]

	Primul caz	Al doilea caz
ADRC	$J_{e,u} = 0.0041$	$J_{e,u} = 0.0044$
MFAC	$J_{e,u} = 0.0517$	$J_{e,u} = 0.053$
MFC	$J_{e,u} = 0.0694$	$J_{e,u} = 0.071$
VRFT	$J_{e,u} = 8.8619 \cdot 10^{-5}$	$J_{e,u} = 1.6707 \cdot 10^{-4}$
IFT	$J_{e,u} = 6.4174 \cdot 10^{-5}$	$J_{e,u} = 1.4086 \cdot 10^{-4}$

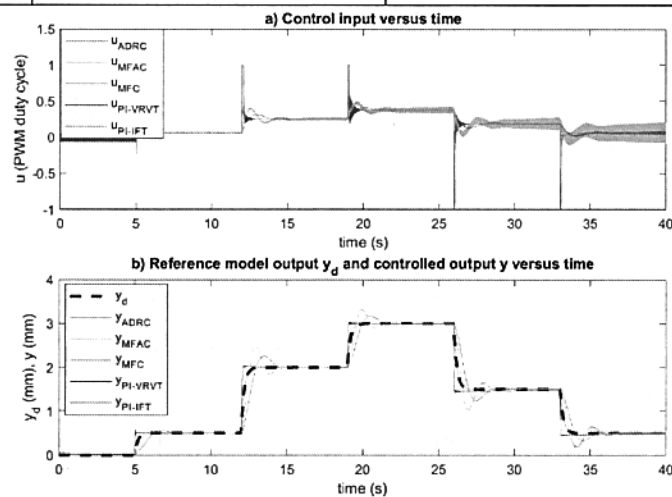


Fig. 11. Rezultatele experimentale în cadrul primului studiu de caz pentru sistemul de reglare automată cu regulator data-driven ADRC (roșu), MFAC (albastru deschis), MFC (mov), VRFT (albastru), IFT (verde) [D14], [D15].

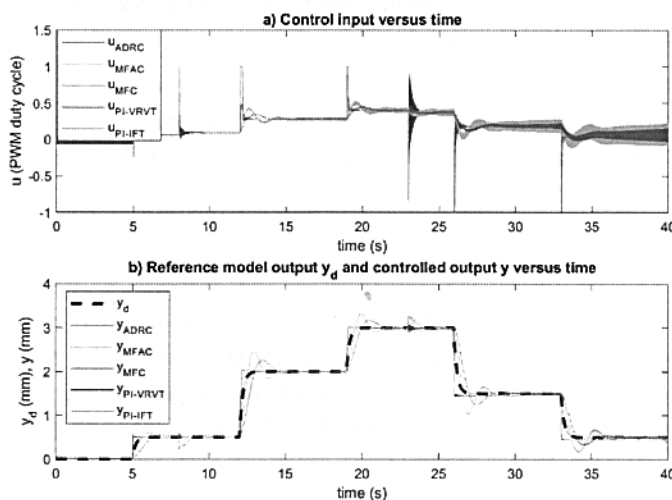


Fig. 12. Rezultatele experimentale în cadrul celui de-al doilea studiu de caz pentru sistemul de reglare automată cu regulator data-driven ADRC (roșu), MFAC (albastru deschis), MFC (mov), VRFT (albastru), IFT (verde) [D14], [D15].

Conform rezultatelor experimentale prezentate prin intermediul Tabelului 1, Fig. 11 și Fig. 12 care a fost realizat un studiu comparativ între algoritmi de tip data-driven ADRC, MFAC, MFC, VRFT și IFT pentru procesul condus de tip SMA. Studiul comparativ din ambele studii de caz a evidențiat că cei cinci algoritmi de tip data-driven au performanțe similare, un mic avantaj având algoritmi IFT și VRFT, dar acest avantaj este atribuit faptului că echipamentul de laborator de tip SMA este un proces complex cu neliniarități puternice care sunt mai bine observate și luate în considerare de IFT prin experimentele de gradient și de VRFT prin experimentul inițial. În cazul în care algoritmi de tip data-driven prezentați în cazul de față sunt aplicați pe alte tipuri de procese, performanțele algoritmilor ar putea să difere.

Noii algoritmi SRA cu RgDD propus în [D20] pentru a controla echipamentul de laborator de tip macara turn ce are în componența sa elemente de execuție bazate pe SMA și algoritmi SRA cu RgDD propuși în [D14] și [D15] au fost testați și validați și pe echipamentul de laborator din cadrul Universității din Bremen, Germania prin intermediul partenerului nostru, Prof. Axel Gräser a echipei sale de cercetare.

Algoritmi reglare fuzzy adaptivi propuși în [D12] pentru reglarea poziției unui ambreiaj acționat electromagnetic cu elemente de execuție bazate pe aliaje cu memoria formei și modelele fuzzy evolutive propuse în [D3] pentru a caracteriza poziția unui proces reprezentativ construit în jurul SMA au fost testate și validate la Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași, România 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.

Deși perioada de finanțare se încheie la jumătatea lunii august, în continuare vor fi publicate lucrări științifice ce constau în implementarea, îmbunătățirea și dezvoltarea reguletoarelor neliniare de tip data-driven cu validări prin simulări și rezultate experimentale pe echipamente de laborator în legătură cu SMA.

În continuare noile sisteme de reglare automată cu RgDD vor fi validate și prin intermediul colaborărilor cu partenerii din mediul industrial (Continental Automotive Timișoara, Airbus Helicopters România, 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]–[D6], [D8]–[D11], [D13], [D14], [D16], [D17], [D19], [D20] și [D22] din perioada august 2020 – august 2022.

### 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, Pushpendra 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] 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, 58, 373-387, 2020.
- [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.

- [28] K. Lakomy and R. Madonski, Cascade extended state observer for active disturbance rejection control applications under measurement noise, *ISA Trans.*, 109, 1–10, 2021.
- [29] Z. Gao, Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design, in *Proc. 2006 American Control Conf.*, Minneapolis, MN, USA, 2399–2405, 2006.
- [30] B. Gao, J. Shao, and X. Yang, A compound control strategy combining velocity compensation with ADRC of electro-hydraulic position servo control system, *ISA Trans.*, 53 (6), 1910–1918, 2014.
- [31] R.-C. Roman, R.-E. Precup, E. M. Petriu, and F. Dragan, Combination of data-driven active disturbance rejection and takagi-sugeno fuzzy control with experimental validation on tower crane systems, *Ener.*, 12 8, 1–19, 2019.
- [32] R.-C. Roman, R.-E. Precup, E. M. Petriu, E.-L. Hedrea, C.-A. Bojan-Dragos, and M.-B. Radac, Model-free adaptive control with fuzzy component for tower crane systems, in *Proc. 2019 IEEE Int. Conf. Syst., Man Cyb., Bari, Italy*, 1384–1389, 2019.
- [33] R.-C. Roman, R.-E. Precup, C.-A. Bojan-Dragos, Alexandra-Iulia Szedlak-Stinean, Combined model-free adaptive control with fuzzy component by virtual reference feedback tuning for tower crane systems, *Proc. Comput. Sci.*, 162, 267–274, 2019.
- [34] S. Xiong, and Z. Hou, Model-free adaptive control for unknown MIMO nonaffine nonlinear discrete-time systems with experimental validation, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, 34 (4), 1727–1739, 2022.
- [35] D. Li and Z. Hou, Perimeter control of urban traffic networks based on model-free adaptive control, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 22 (10), 6460–6472, 2021.
- [36] R.-E. Precup, R.-C. Roman, T.-A. Teban, A. Albu, E. M. Petriu, and C. Pozna, Model-free control of finger dynamics in prosthetic hand myoelectric-based control systems, *Stud. Informat. Control*, 29 (4), 399–410, 2020.
- [37] M. Fliess, C. Join, and D. Sauter, Defense against DoS and load altering attacks via model-free control: A proposal for a new cybersecurity setting, in *Proc. 2021 5th Int. Conf. Control Fault-Tol. Syst.*, Saint-Raphael, France, 58–65, 2021.

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

- **Lucrări de revistă:**

- [D1] R.-E. Precup, **R.-C. Roman**, E.-L. Hedrea, E. M. Petriu, and C.-A. Bojan-Dragos, "Data-Driven Model-Free Sliding Mode and Fuzzy Control with Experimental Validation," *International Journal of Computers Communications & Control*, 18 (1), 1-18, 2020, impact factor (IF) = 2.635, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 2.635.
- [D2] R.-E. Precup, R.-C David, **R.-C. Roman**, E. M. Petriu, and A.-I. Szedlak-Stinean, "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) = 2.259, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 2.259.
- [D3] 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)*, 24 (4), 353-365, 2021, impact factor (IF) = 0.852, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 0.852.
- [D4] R.-E. Precup, R.-C David, **R.-C. Roman**, A.-I. Szedlak-Stinean, 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) = 2.648, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 2.648.

- [D5] 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) = 2.444, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 2.444.
- [D6] R.-E. Precup, S. Preitl, C.-A. Bojan-Dragos, E.-L. Hedrea, **R.-C. Roman** and E. M. Petriu, "A Low-Cost Approach to Data-Driven Fuzzy Control of Servo Systems," *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 021-036, 2022, impact factor (IF) = 4.622, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 4.622.
- [D7] R.-E. Precup, **R.-C. Roman**, E.-L. Hedrea, C.-A. Bojan-Dragos, M.-M. Damian and M.-L. Nedelcea, "Performance Improvement of Low-Cost Iterative Learning-Based Fuzzy Control Systems for Tower Crane Systems," *International Journal of Computers Communications & Control*, vol. 17, no. 1, pp. 1-18, 2022, impact factor (IF) = 2.635, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 2.635.
- [D8] I. A. Zamfirache, R.-E. Precup, **R.-C. Roman** and E. M. Petriu, "Policy Iteration Reinforcement Learning-based control using a Grey Wolf Optimizer algorithm," *Information Sciences*, vol. 585, pp. 162-175, 2022, impact factor (IF) = 8.233, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 8.233.
- [D9] I. A. Zamfirache, R.-E. Precup, **R.-C. Roman** and E. M. Petriu, "Reinforcement Learning-based control using Q-learning and gravitational search algorithm with experimental validation on a nonlinear servo system," *Information Sciences*, vol. 583, pp. 99-120, 2022, impact factor (IF) = 8.233, IF according to 2021 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2022 = 8.233.

- **Lucrări de conferință publicate:**

- [D10] **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, pp. 1-6, 2020.
- [D11] **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, pp. 1-6, 2020.
- [D12] 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.
- [D13] 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.
- [D14] **R.-C. Roman**, R.-E. Precup, S. Preitl, A.-I. Szedlak Stinean, C.-A. Bojan-Dragos, E.-L. Hedrea and E. M. Petriu, "PI Controller Tuned via Data-Driven Algorithms for Shape Memory Alloy Systems," 1<sup>st</sup> IFAC Workshop on Control of Complex Systems, COSY 2022, Bologna, Italy, pp. 1-6, 2022.
- [D15] **R.-C. Roman**, R.-E. Precup, S. Preitl, C.-A. Bojan-Dragos, A.-I. Szedlak Stinean and E.-L. Hedrea, "Data-Driven Control Algorithms for Shape Memory Alloys," 6<sup>th</sup> IEEE Conference on Control Technology and Applications, Trieste, Italy, pp. 1-7, 2022.
- [D16] R.-E. Precup, E.-L. Hedrea, **R.-C. Roman**, E. M. Petriu, C.-A. Bojan-Dragos, A.-I. Szedlak Stinean and F.-A. Paulescu, "AVOA-Based Tuning of Low-Cost Fuzzy Controllers for Tower Crane



Systems," 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Padova, Italy, pp. 1-6, 2022.

[D17] R.-E. Precup, E.-L. Hedrea, **R.-C. Roman**, E. M. Petriu, C.-A. Bojan-Dragos and A.-I. Szedlak Stinean, "GWO-Based Performance Improvement of PD-Type Iterative Learning Fuzzy Control of Tower Crane Systems," 2022 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Anchorage, AK, USA, pp. 1-6, 2022.

[D18] A.-I. Szedlak Stinean, R.-E. Precup and **R.-C. Roman**, "Linear and nonlinear observers developed for direct current electric drive systems," 2022 9th International Conference on Computers Communications and Control, Baile Felix, Romania, pp. 1-6, 2022.

[D19] C.-A. Bojan-Dragos, R.-E. Precup, E. M. Petriu, **R.-C. Roman**, E.-L. Hedrea and A.-I. Szedlak Stinean, "GWO-Based Optimal Tuning of Controllers for Shape Memory Alloy Wire Actuators," 6<sup>th</sup> IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences, Cluj-Napoca, Romania, pp. 1-6, 2022.

[D20] **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," Procedia Computer Science, vol. 199, Chengdu, China, pp. 157-165, 2022.

- **Cărți publicate:**

[D21] 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:**

[D22] 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

