

# RAPORTARE ȘTIINȚIFICĂ

## Raportul Științific mai – decembrie 2024

- **Contract nr. 9/2024; etapă nr. 1/2024; titlu proiect: Sisteme de Transport Intermodale pentru Îmbunătățirea Conectivității și Accesibilității Urbane; cod de depunere ERANET-ENUAC-e-MATS.**

Universitatea Politehnica Timișoara (UPT) colaborează în cadrul acestui proiect cu Chalmers University of Technology (CTH), Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Zhejiang University (ZJU), The Hong Kong Polytechnic University Shenzhen Research Institute (PolyU-SZRI), Chongqing University (CQU), WSP Sverige AB, FellowBot AB, Hangzhou Comprehensive Transportation Center (HZCTC, cooperation partner) și Enjoyor Ltd Co. (cooperation partner). UPT coordonează partenerii din Europa, în strânsă colaborare (coordonare) cu CTH. Coordonarea pentru partenerii din China este asigurată de ZJU.

### **1. Descrierea științifică cu punerea în evidență a rezultatelor etapei anuale și gradul de realizare a obiectivelor**

**Rezultatele** prevăzute a fi obținute în cadrul proiectului în această etapă sunt:

- Realizarea documentației pentru coordonare, gestionarea riscurilor și asigurarea calității, stabilind proceduri eficiente de management.
- Colectarea datelor comportamentale și dezvoltarea modelelor pentru domeniul transporturilor.
- Pregătirea rapoartelor pentru documentarea activităților.

Cele patru obiective care se desfășoară pe parcursul acestui proiect sunt:

- **Obiectivul 1:** La nivel strategic, dezvoltarea unui cadru holistic de planificare a infrastructurii și a unor metode care să reconcilieze rețeaua de transport, micromobilitatea partajată (shared micro-mobility - SMM în engleză), facilitățile de încărcare și rețeaua de energie electrică cu luarea în considerare a comportamentului utilizatorilor și echității.

- **Obiectivul 2:** La nivel tactic, dezvoltarea unei rețele electrice de transport public și a unui cadru de dezvoltare a proiectării și metode de minimizare a costurilor și de maximizare a eficienței și

accesibilității, considerând integrarea cu SMM, managementul bateriilor, facilități de încărcare, efectele asupra rețelei de energie electrică și răspunsurile comportamentale ale călătorilor.

- **Obiectivul 3:** La nivel operațional, dezvoltarea unui cadru de conducere operațională adaptivă și metode care folosesc tehnologii informatice și de comunicații (information and communication technologies - ICT în engleză) și managementul bateriilor pentru crearea strategiilor de funcționare a autobuzelor electrice în timp real în scopul îmbunătățirii eficienței și rezilienței. Modelele pot fi adaptabile la schimbări dinamice datorate incidentelor.

- **Obiectivul 4:** La nivel de utilizator, evaluarea răspunsurilor comportamentale ale utilizatorilor, rezilienței și accesibilității sistemelor de transport intermodale, considerând factori psihologici și diversitatea utilizatorilor. În același timp vor fi exploatate strategii de schimbarea a utilizatorilor pentru mobilitate sustenabila și îmbunătățirea echității.

În cadrul **obiectivului 1** aflat în desfășurare este realizată dezvoltarea unui cadru holistic de planificare a infrastructurii prin contribuțiile partenerilor UPT și PolyU-SZRI. În cadrul WP 2 din propunerea de proiect, UPT, alături de VTI și PolyU-SZRI, analizează impactul planificării infrastructurii și a rețelelor de transport asupra sistemului energetic urban. PolyU-SZRI contribuie la cercetarea privind echilibrarea sistemelor SMM, cum ar fi scuterele electrice, abordând variabilitatea cererii și optimizând alocarea acestora pentru a maximiza eficiența. În WP 5 din propunerea de proiect, UPT colectează date comportamentale pentru a dezvolta modele predictive care reflectă diversitatea utilizatorilor, cu sprijinul CTH și ZJU, care oferă expertiză în accesibilitate și reziliență. Această colaborare contribuie la integrarea utilizatorilor în strategiile de planificare pentru mobilitate neutră din punct de vedere climatic. Acest obiectiv este realizat în cadrul WP 2 și WP 5 din propunerea de proiect.

În cadrul **obiectivului al 2-lea** aflat în desfășurare este realizată dezvoltarea unei rețele electrice de transport public, asociată cu dezvoltarea unui cadru de proiectare tactică. În WP 2 din propunerea de proiect, UPT contribuie la optimizarea sistemului energetic urban, colaborând cu VTI și HZCTC pentru a modela stabilitatea sistemului energetic afectat de încărcarea vehiculelor electrice. PolyU-SZRI ajută prin cercetarea stabilității rețelelor CEPT (connected electric public transit – CEPT în engleză) și propunerea de măsuri de control preventiv și de urgență pentru a preveni neajunsurile din rețelele de transport public. În cadrul WP 4 din propunerea de proiect, coordonat de UPT, sunt proiectate metode de reglare adaptivă pentru minimizarea costurilor și maximizarea eficienței vehiculelor electrice autonome, beneficiind de suportul CQU pentru date despre baterii și CTH pentru algoritmi avansați de predicție. Acest obiectiv se realizează în cadrul SP 2 și WP 4 din propunerea de proiect.

În cadrul **obiectivului al 3-lea** aflat în desfășurare este realizată dezvoltarea unui cadru operațional adaptiv pentru vehiculele electrice autonome din WP 4 din propunerea de proiect, coordonat de UPT. Echipa UPT dezvoltă algoritmi de tip data-driven și testează modele de reglare adaptivă pentru optimizarea traiectoriilor vehiculelor electrice, reducerea consumului de energie și îmbunătățirea rezilienței. PolyU-SZRI contribuie prin analiza impactului controlului în timp real asupra stabilității rețelelor de transport și prin explorarea soluțiilor de optimizare care conectează SMM și CEPT, oferind o perspectivă complementară asupra integrării sistemelor. Acest obiectiv se realizează în cadrul WP 4 din propunerea de proiect.

În cadrul **obiectivului al 4-lea** aflat în desfășurare este realizată evaluarea răspunsurilor comportamentale ale utilizatorilor și accesibilității sistemelor de transport intermodal se realizează în cadrul WP 5 din propunerea de proiect. UPT dezvoltă în momentul de față modele predictive bazate pe date comportamentale colectate, contribuind la înțelegerea diversității utilizatorilor și la elaborarea de strategii pentru mobilitate sustenabilă. PolyU-SZRI a explorat alocarea scuterelor electrice și impactul acestora asupra mobilității urbane durabile, precum și măsuri pentru creșterea încrederii utilizatorilor în sistemele CEPT, asigurând o complementaritate cu eforturile UPT în acest WP. Acest obiectiv este realizat în cadrul WP 5 din propunerea de proiect.

#### **Remarci:**

1. În acest raport științific textele, figurile și parțial relațiile au fost preluate din lucrările elaborate de echipa de cercetare.

2. Toate lucrările publicate sau în curs de publicare și care conțin rezultate de cercetare obținute în cadrul acestui proiect au menționat sprijinul UEFISCDI în secțiunea de Acknowledgements, alături de specificarea codului de depunere.

Descrierea științifică și tehnică este concentrată asupra prezentării sintetice a cercetării efectuate în cadrul activității 1.3, analiza stadiului actual al cercetărilor teoretice și al aplicațiilor experimentale realizate pe diverse echipamente de laborator, în speță macaraua 3D conform [C10]. Sunt propuse regulatoare de tip Active Disturbance Rejection Control de ordinul întâi și al doilea pentru un proces de tip macara 3D, proces similar transporturilor. În etapele ulterioare acest tip de regulator va fi validat pe model matematic complex care să permită reglarea optimală a autovehiculelor. În prezent modelul matematic este în dezvoltare conform activității 1.2.

Algoritmii Active Disturbance Rejection Control (ADRC) [1] sunt, în opinia echipei UPT, printre cei mai des utilizați algoritmi specifici tehnicilor de reglare bazate pe date sau experimente (data-driven) [2]. Algoritmii ADRC au apărut ca o abordare promițătoare pentru proiectarea reglării robuste datorită mai multor avantaje cheie. Un avantaj semnificativ constă în capacitățile lor robuste de rejectare a perturbațiilor. ADRC atenuează în mod eficient impactul factorilor externi asupra performanței sistemului, asigurând buna funcționare chiar și în prezența perturbațiilor. În plus, ADRC oferă un design independent de model, nefiind necesară utilizarea unui model matematic complex și precis al procesului condus. Această caracteristică face ca ADRC să fie deosebit de potrivit pentru aplicații în care dinamica sistemului este complexă sau nu este cunoscută în totalitate de către proiectanți. În plus, ADRC prezintă capacități puternice în gestionarea neliniarităților inerente multor sisteme din lumea reală. Acest avantaj permite o reglare mai precisă în comparație cu metodele de reglare tradiționale care se pot confrunta cu neliniarități. Din momentul în care ADRC a fost propus inițial, acesta a fost îmbunătățit și validat pe numeroase tipuri de procese, iar unele dintre cele mai recente abordări sunt: în [3], ADRC pentru vehicule cu șenile fără pilot în formație leader-follow, în [4], o metodă descentralizată de partajare și stabilizare a puterii bazată pe ADRC este utilizată pentru a conduce un sistem hibrid de stocare a energiei, în [5], ADRC bazat pe un regulator de rezonanță cvasi-proportională și compensarea diferențială a perturbațiilor este utilizat pentru a conduce un motor sincron cu magnet permanent interior, în [6], două versiuni ADRC (ADRC generalizat și ADRC în cascadă) sunt utilizate pentru a regla acționările electrice, în [7], un ADRC cu o funcție neliniară este aplicat unui sistem de macara turn

cu un efect de pendul dublu, în [8], ADRC cu un observator de stare extins neliniar (ESO) și un regulator de mod glisant este aplicat pe o macara 3D, în [9], ADRC de ordinul întâi este combinat cu tehnica Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) și validat pe sisteme de tip macara turn, în [10], ADRC de ordinul doi este validat pe sisteme de tip pendul cărucior, în [11], ADRC este combinat cu logica fuzzy și VRFT este validat pe sisteme de macarale turn, iar în [12], ADRC combinat cu regulatorul modului glisant este validat pe sisteme de macarale turn. Algoritmii de tip data-driven utilizați în mod obișnuit includ, de asemenea, algoritmi de tip model-free control [2], [13], model-free adaptive control [2], [14] și VRFT [2], [15].

A fost efectuată aplicarea ca ADRC de ordinul întâi și de ordinul doi pe o macara 3D [16], [17], pentru că acest proces este similar proceselor utilizate în domeniul transporturilor. Prin utilizarea unui ESO, algoritmi permit estimarea perturbațiilor în timp real fără a necesita un model matematic precis al sistemului. Se dorește atenuarea perturbațiilor de sarcină externă și asigurarea urmării precise a traiectoriei pentru macara. Minimizarea pătratelor erorii ale unei funcții obiectiv este luată în considerare pentru o comparație corectă, conducând la acordarea optimală a parametrilor ambelor regulatoare utilizând algoritmul metaeuristic de optimizare African Vultures Optimization Algorithm (AVOA) [18], [19].

Algoritmii ADRC de ordinul întâi și al doilea au fost validați folosind experimente în timp real pe echipamentul de laborator de tip macara 3D instalat în unul din laboratoarele echipei de cercetare din UPT [16]. Macaraua 3D are trei grade de libertate, permițând reglarea autonomă a pozițiilor pe axa x, axa y și axa z. Modelul matematic detaliat care descrie comportamentul macaralei 3D este prezentat în [16] și [17]. Acest model încorporează următoarele variabile de stare:  $x_1$  este distanța dintre cărucior și centrul șinei,  $x_2$  este viteza căruciorului pe axa x (direcția  $x_1$ ),  $x_3$  este distanța dintre șină (cu căruciorul) și centrul cadrului de construcție,  $x_4$  este viteza șinei (cu căruciorul) pe direcția  $x_3$ ,  $x_5$  este unghiul acut dintre linia de ridicare a sarcinii utile și șină,  $x_6$  este viteza unghiulară corespunzătoare lui  $x_5$ ,  $x_7$  este unghiul ascuțit dintre linia de ridicare a sarcinii utile și linia verticală,  $x_8$  este viteza unghiulară corespunzătoare lui  $x_7$ ,  $x_9$  este lungimea liniei de ridicare (poziția sarcinii utile), iar  $x_{10}$  este viteza sarcinii utile de-a lungul liniei de ridicare. Intrările de comandă ale macaralei 3D sunt  $u_1 \in [-1, 1]$ ,  $u_2 \in [-1, 1]$  și  $u_3 \in [-1, 1]$ , factorul de umplere PWM (Pulse With Modulation) aplicat primului, celui de-al doilea și celui de-al treilea motor de curent continuu (DC) pentru a regla prima ieșire  $y_1(m) = x_1$  (axa x), a doua  $y_2(m) = x_2$  (axa y) și, respectiv, a treia  $y_3(m) = x_9$  (axa z). Modelul ține seama de neliniaritățile actuatorului care afectează mișcarea macaralei. O descriere mai cuprinzătoare a acestor neliniarități și modelul matematic complet cu constantele sale pot fi găsite în referințele [16] și [17].

### ***Algoritmii ADRC de ordinul întâi***

Deși procesul are o componentă integratoare pe fiecare ieșire dacă se efectuează reglarea poziției, dezvoltarea algoritmului ADRC de ordinul întâi începe prin considerarea unui filtru trece-jos ca un model adecvat pentru dinamica procesului în timp continuu, știind că sistemul funcționează în domeniul numerelor reale

$$T \dot{y}_i + y_i = K u_i, \tag{1}$$

în care indicele inferior  $t$  reprezintă argumentul domeniului timp continuu, prin urmare intrarea comenzii este notată cu  $u_t$ , iar ieșirea reglată este reprezentată prin  $y_t$ , în plus,  $K$  semnifică constanta procesului, cuantificând răspunsul sistemului la modificările intrării de comandă, iar  $T$  reprezintă perioada caracteristică a oscilațiilor naturale ale sistemului [1], [9].

Relația dintre  $K$  și constanta de timp  $T$  este exprimată prin  $b = K / T$ , în care  $b = b_0 + \Delta b$  cu  $b \in \mathbb{R}$ ,  $b_0$  reprezintă valoarea estimată (estimări acceptate), iar  $\Delta b$  reprezintă eroarea de modelare necunoscută. Descompunerea lui  $b$  permite formularea unei versiuni modificate a modelului procesului în forma [1], [9]

$$\dot{y}_t = -1/T y_t + 1/T \delta_t + (\Delta b + b_0) u_t, \quad (2)$$

Influența factorilor externi și a incertitudinilor de modelare este luată în considerare prin termenul de perturbare generalizat

$$f_t = -y_t / T + \delta_t / T + \Delta b u_t, \quad (3)$$

acest termen încorporează impactul atât al perturbațiilor necunoscute, reprezentate prin  $\delta_t$ , cât și al erorilor de modelare necunoscute, semnificate prin  $\Delta b$ .

Prin încorporarea termenului de perturbare generalizat  $f_t$  din (3) în modelul de proces de tip filtru trece-jos de ordinul întâi din (1), este obținut modelul din (2). Acest lucru transformă în esență modelul inițial într-o reprezentare de tip integrator perturbat. Expresia rezultată în (2) duce la derivata ieșirii sistemului [1], [9]:

$$\dot{y}_t = f_t + b_0 u_t, \quad (4)$$

Pentru a obține o reprezentare de stare (în spațiul stărilor) a modelului integrator perturbat prezentat în (4), substituțiile care definesc două variabile de stare sunt  $x_{1t} = y_t$  și  $x_{2t} = \dot{y}_t$ . Prin urmare, reprezentarea de stare devine

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{1t} \\ \dot{x}_{2t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}_t + \begin{pmatrix} b_0 \\ 0 \end{pmatrix} u_t + \begin{pmatrix} b_0 \\ 0 \end{pmatrix} f_t, \quad y_t = (1 \ 0) \mathbf{x}_t, \quad (5)$$

în care  $\mathbf{x}_t = (x_{1t} \ x_{2t})^T$  și  $T$  evidențiază transpunerea matriceală. Deoarece determinarea precisă a derivatei termenului perturbator  $f_t$  nu este practică, este utilizat un observator de stare Luenberger extins (ELSO) pentru a estima starea utilizând numai semnalele de intrare și de ieșire ale sistemului. ELSO este caracterizat de matricele aferente unui model în timp continuu  $\mathbf{A}_c \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ ,  $\mathbf{B}_c \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ , și  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ , împreună cu matricea  $\mathbf{L} = [l_1 \ l_2]^T$ . Această ultimă matrice este proiectată prin plasarea valorilor proprii ale matricei  $\mathbf{A}_c - \mathbf{L}\mathbf{C}$  (spectrului acestei matrice) în semiplanul complex stâng. Poziționarea acestor valori proprii are un impact semnificativ asupra performanței sistemului de reglare, în special atunci când sunt proiectate ulterior strategiile de reglare automată optimală. Ieșirile ELSO furnizează estimate ale ambelor variabile de stare,  $x_{1t}$  (care aproximează

ieșirea reglată,  $y_t$ ) și  $x_{2t}$  (care aproximează termenul perturbator generalizat,  $f_t$ ). Pentru a reflecta în mod explicit estimarea lui  $y_t$ , este efectuată înlocuirea lui  $x_{1t}$  cu estimata lui  $y_t$  în formularea ELSO în timp continuu, obținându-se

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \hat{x}_{1t} \\ \hat{x}_{2t} \end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{x}}_t} = \underbrace{\begin{pmatrix} -l_1 & 1 \\ -l_2 & 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}_c - \mathbf{L}\mathbf{C}} \hat{\mathbf{x}}_t + \underbrace{\begin{pmatrix} b_0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}_c} u_t + \underbrace{\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix}}_{\mathbf{L}} y_t, \hat{y}_t = \underbrace{(1 \ 0)}_{\mathbf{C}} \hat{\mathbf{x}}_t. \quad (6)$$

Pentru a încorpora comportamentul ZOH (zero-order-hold) și a adapta observatorul la un sistem în timp discret, este discretizat ELSO din (6). Acest proces de discretizare, luând în considerare o perioadă de eșantionare de  $T_s$ , conduce la următoarea reprezentare ELSO în timp discret [1], [9]:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \hat{x}_{1k+1} \\ \hat{x}_{2k+1} \end{pmatrix}}_{\hat{\mathbf{x}}_{k+1}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1-l_1 & T_s \\ -l_2 & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}_d} \hat{\mathbf{x}}_k + \underbrace{\begin{pmatrix} b_0 T_s & l_1 \\ 0 & l_2 \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}_d} \begin{pmatrix} u_k \\ y_k \end{pmatrix}, \hat{y}_k = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}_k. \quad (7)$$

ELSO în timp discret din (7) este caracterizat de matricele  $\mathbf{A}_d \in R^{2 \times 2}$ ,  $\mathbf{B}_d \in R^{2 \times 1}$ , și  $\mathbf{C} \in R^{1 \times 2}$ . Aceste matrice și stările estimate, notate cu  $\hat{x}_{1k} = \hat{y}_k$ , și  $\hat{x}_{2k} = \hat{f}_k$ , servesc drept elemente cruciale pentru definirea legii ADRC de ordinul întâi. Legea de reglare în sine se bazează pe conceptul de eroare de urmărire  $\hat{e}_k = y_k^* - \hat{x}_{1k}$ , care este calculată ca diferența dintre traiectoria de referință,  $y_k^*$ , și ieșirea reală a sistemului, care este variabila de stare  $\hat{x}_{1k}$ . Legea ADRC de ordinul întâi, deși este adesea prezentată ca o abordare nouă, poate fi privită ca o modificare a regulatorului proporțional clasic [1], [9]:

$$u_k = [K \underbrace{(y_k^* - \hat{x}_{1k})}_{\hat{e}_k} - \hat{f}_k] / b_0. \quad (8)$$

### **Algoritmii ADRC de ordinul al doilea**

Algoritmul ADRC de ordinul al doilea este conceput prin considerarea unui filtru trece-jos de ordinul al doilea ca model pentru dinamica procesului în timp continuu, ca și în primul caz, sistemul funcționează în domeniul numerelor reale

$$T^2 \ddot{y}_t + 2DT \dot{y}_t + y_t = K u_t + \delta_t, \quad (9)$$

în care  $D$  indică factorul de amortizare al procesului, iar restul parametrilor din (9) au aceeași semnificație ca în cazul algoritmului ADRC de ordinul întâi [1], [10]-[12].

Știind expresiile lui  $b$  din ADRC-ul de ordinul întâi, versiunea modificată a modelului procesului devine

$$\ddot{y}_t = -2D\dot{y}_t/T - y_t/T^2 + \delta_t/T^2 + \Delta b u_t + b_0 u_t, \quad (10)$$

Un termen cunoscut sub numele de perturbație generalizată este încorporat în model pentru a surprinde influența factorilor externi și a incertitudinilor în comportamentul sistemului care nu sunt modelate în mod explicit:

$$f_t = -2D\dot{y}_t/T - y_t/T^2 + \delta_t/T^2 + \Delta b u_t. \quad (11)$$

Introducerea termenului de perturbație generalizată din (11) în modelul de proces de tip filtru trece-jos de ordinul doi din (9) conduce la modelul din (10). Folosind (11), modelul din (10) exprimă derivata a doua a ieșirii sistemului,  $\ddot{y}_t$ :

$$\ddot{y}_t = b_0 u_t + f_t. \quad (12)$$

Pentru a obține reprezentarea de stare a modelului de proces de tip dublu integrator perturbat dat în (12), sunt utilizate substituțiile variabilelor de stare  $x_{1t} = y_t$ ,  $x_{2t} = \dot{y}_t$  și  $x_{3t} = f_t$  pentru. Rezultă modelul de stare [1], [10]-[12]:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{1t} \\ \dot{x}_{2t} \\ \dot{x}_{3t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{1t} \\ x_{2t} \\ x_{3t} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{pmatrix} u_t + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} f_t, \quad y_t = (1 \ 0 \ 0) \mathbf{x}_t, \quad (13)$$

în care  $\mathbf{x}_t = (x_{1t} \ x_{2t} \ x_{3t})^T$ . Determinarea derivatei exacte a termenului de perturbare nu este practică. Pentru a face față acestei provocări, este utilizată o estimare a stărilor folosind ELSO. ELSO este parametrizat prin matricele în timp continuu  $\mathbf{A}_c \in R^{3 \times 3}$ ,  $\mathbf{B}_c \in R^{3 \times 1}$  și  $\mathbf{C} \in R^{1 \times 3}$  și matricea observatorului  $\mathbf{L} = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T$ , care este proiectată prin alocarea valorilor proprii ale matricei  $\mathbf{A}_c - \mathbf{L}\mathbf{C}$  (spectrului acestei matrice) în semiplanul complex stâng. Plasarea acestor valori proprii are un impact semnificativ asupra performanțelor sistemului de reglare automată mai ales în legătură cu sistemele de reglare automată optimală. Modelul ELSO în timp continuu este:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \hat{\dot{x}}_{1t} \\ \hat{\dot{x}}_{2t} \\ \hat{\dot{x}}_{3t} \end{pmatrix}}_{\hat{\dot{\mathbf{x}}}_t} = \underbrace{\begin{pmatrix} -l_1 & 1 & 0 \\ -l_2 & 0 & 1 \\ -l_3 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}_c - \mathbf{L}\mathbf{C}} \hat{\mathbf{x}}_t + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}_c} u_t + \underbrace{\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix}}_{\mathbf{L}} y_t, \quad \hat{y}_t = \underbrace{(1 \ 0 \ 0)}_{\mathbf{C}} \hat{\mathbf{x}}_t. \quad (14)$$

Pentru a ține seama de comportamentul ZOH prezent în sistemul de reglare automată și pentru a transforma observatorul într-o reprezentare în timp discret adecvată pentru implementarea numerică, este discretizat ELSO în timp continuu din (14) luând în considerare perioada de eșantionare  $T_s$ . Este obținută următoarea reprezentare a ELSO în timp discret [1], [10]-[12]:

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_{1k+1} \\ \hat{x}_{2k+1} \\ \hat{x}_{3k+1} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1-l_1 & T_s & 0.5T_s^2 \\ -l_2 & 1 & T_s \\ -l_3 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}_d} \begin{pmatrix} \hat{x}_{1k} \\ \hat{x}_{2k} \\ \hat{x}_{3k} \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0.5b_0 T_s^2 & l_1 \\ b_0 T_s & l_2 \\ 0 & l_3 \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}_d} \begin{pmatrix} u_k \\ y_k \end{pmatrix}, \hat{y}_k = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}_k. \quad (15)$$

ELSO în timp discret rezultat are în componența sa matricile  $\mathbf{A}_d \in R^{3 \times 3}$  și  $\mathbf{B}_d \in R^{3 \times 2}$ . Aceste matrice sunt versiunile discretizate ale matricelor aferente modelului în timp continuu, notate cu  $\mathbf{A}_C$  și  $\mathbf{B}_C$  în (14). Algoritmul ADRC utilizează acest observator pentru a proiecta o lege de reglare în timp discret. Această lege de reglare este echivalentă din punct de vedere funcțional cu un regulator după stare completă bazat pe estimatoare, care încorporează intrarea de referință,  $y_k^*$ , eroarea de urmărire  $\hat{e}_k = y_k^* - \hat{x}_{1k}$ , și parametrii regulatorului,  $K_1$  și  $K_2$ , pentru a calcula semnalul de comandă [1], [10]-[12]. Legea de reglare are expresia:

$$u_k = [K_1 \underbrace{(y_k^* - \hat{x}_{1k})}_{e_k} - K_2 \hat{x}_{2k} - \hat{x}_{3k}] / b_0. \quad (16)$$

### Configurația experimentală și rezultate

Configurația experimentală a algoritmilor ADRC de ordinul întâi și al doilea care sunt validați utilizând experimente urmărește reglarea pozițiilor pe axele x, y și z ale echipamentului de laborator de tip macara 3D. Performanțele sistemului de reglare cu algoritmul ADRC sunt evaluate după rezolvarea următoarei probleme de optimizare prin intermediul AVOA:

$$\boldsymbol{\theta}_0^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_0} J_{e,u}(\boldsymbol{\theta}_0), J_{e,u}(\boldsymbol{\theta}_0) = \sum_{k=1}^N [e_{1k}^2(\boldsymbol{\theta}_{10}) + e_{2k}^2(\boldsymbol{\theta}_{20}) + e_{3k}^2(\boldsymbol{\theta}_{30})], \quad (17)$$

în care, pentru a distinge între cele trei axe ale macaralei 3D, se utilizează o notație cu indice inferior. Aici, indicele 1 se referă la axa x, indicele 2 reprezintă axa y, iar indicele 3 corespunde axei z. Pentru algoritmul ADRC de ordinul întâi și pentru algoritmul ADRC de ordinul al doilea se utilizează o notație cu indice inferior similar. Matricea coloană  $\boldsymbol{\theta}_0^* = [\boldsymbol{\theta}_{10}^{*T} \ \boldsymbol{\theta}_{20}^{*T} \ \boldsymbol{\theta}_{30}^{*T}]^T$  reprezintă vectorul parametrilor optimali ai algoritmilor ADRC de ordinul întâi și de ordinul doi, iar

$$\boldsymbol{\theta}_{\text{ADRC1}} = [b_0 \ \mathbf{K}]^T, \boldsymbol{\theta}_{\text{ADRC2}} = [b_0 \ K_1 \ K_2]^T. \quad (18)$$

Pentru a asigura condiții de evaluare similare, experimentele vor utiliza condiții inițiale nule pentru toate stările, un orizont de timp de 70 s, o perioadă de eșantionare de  $T_s = 0.01$  s (rezultând  $N = 7000$  eșantioane), iar perturbațiile aditive externe sunt

$$\begin{aligned} d_{y_1k} &= 0 \text{ if } k \in [0, 8/T_s], 0.05 \text{ if } t_d \in (8/T_s, 55/T_s], -0.05 \text{ if } k \in (55/T_s, 70/T_s], \\ d_{y_2}(t_d) &= 0 \text{ if } k \in [0, 17/T_s], -0.05 \text{ if } k \in (17/T_s, 60/T_s], 0.05 \text{ if } k \in (60/T_s, 70/T_s], \\ d_{y_3}(t_d) &= 0 \text{ if } k \in [0, 23/T_s], 0.05 \text{ if } k \in (23/T_s, 65/T_s], -0.05 \text{ if } k \in (65/T_s, 70/T_s]. \end{aligned} \quad (19)$$



Trajectoriile de referință specifice pentru fiecare axă (x, y și z) sunt

$$y_{1k}^* = y_{1k}^{\sim} H_{y_{1k}^{\sim}}, y_{2k}^* = y_{2k}^{\sim} H_{y_{2k}^{\sim}}, y_{3k}^* = y_{3k}^{\sim} H_{y_{3k}^{\sim}}, \quad (20)$$

în care  $H_{y_{1k}^{\sim}} = 0.04877 / (z - 0.9512)$ ,  $H_{y_{2k}^{\sim}} = 0.0465 / (z - 0.9535)$ ,  $H_{y_{3k}^{\sim}} = 0.03278 / (z - 0.9672)$ , și

$$\begin{aligned} y_{1k}^{\sim} &= 0.15 \text{ if } k \in [0, 20/T_s], 0.1 \text{ if } k \in (20/T_s, 35/T_s], -0.05 \text{ if } k \in (35/T_s, 50/T_s], \\ &0 \text{ if } k \in (50/T_s, 70/T_s], \\ y_{2k}^{\sim} &= 0 \text{ if } k \in [0, 5/T_s], 0.15 \text{ if } k \in (5/T_s, 25/T_s], -0.15 \text{ if } k \in (25/T_s, 40/T_s], \\ &0 \text{ if } k \in (40/T_s, 70/T_s], \\ y_{3k}^{\sim} &= 0 \text{ if } k \in [0, 15/T_s], 0.1 \text{ if } k \in (15/T_s, 30/T_s], -0.05 \text{ if } k \in (30/T_s, 45/T_s], \\ &0 \text{ if } k \in (45/T_s, 70/T_s]. \end{aligned} \quad (21)$$

Pentru a evalua eficacitatea ELSO înainte de proiectarea parametrilor ADRC, este efectuat un experiment în buclă deschisă. Un semnal de tip chirp servește drept intrare pentru echipamentul de tip macara 3D. Acest semnal de tip chirp începe la o frecvență joasă de 0.1 Hz și crește treptat până la o frecvență mai mare de 2 Hz în intervalul de timp de 35 de secunde al experimentului. De asemenea, semnalul are o amplitudine de 0.5 radiani. Ideea experimentului actual este de a evalua cât de bine urmărește ELSO ieșirea (poziția) reală a sistemului reglat în condiții de intrare dinamică.

Proiectarea ELSO implică matricea  $\mathbf{L}_0 = [\mathbf{L}_{10}^T \ \mathbf{L}_{20}^T \ \mathbf{L}_{30}^T]^T$ , în care  $\mathbf{L}_{1\text{ADRC1}}^T = [l_{11} \ l_{12}] = [0.99 \ 0.242]$ ,  $\mathbf{L}_{2\text{ADRC1}}^T = [l_{21} \ l_{22}] = [1 \ 0.2475]$ ,  $\mathbf{L}_{3\text{ADRC1}}^T = [l_{31} \ l_{32}] = [0.9 \ 0.2]$  sunt specifice algoritmului ADRC de ordinul întâi pentru axele x, y și, respectiv, z, și  $\mathbf{L}_{1\text{ADRC2}}^T = [l_{11} \ l_{12} \ l_{13}] = [1.001 \ 0.288 \ 0.022]$ ,  $\mathbf{L}_{2\text{ADRC2}}^T = [l_{21} \ l_{22} \ l_{23}] = [1.01 \ 0.2115 \ 0.0124]$ ,  $\mathbf{L}_{3\text{ADRC2}}^T = [l_{31} \ l_{32} \ l_{33}] = [0.97 \ 0.282 \ 0.0216]$  specifice algoritmului ADRC de ordinul al doilea pentru axele x, y și, respectiv, z. Acești vectori sunt determinați prin plasarea valorilor proprii ale matricei  $\mathbf{A}_c - \mathbf{LC}$  în semiplanul stâng al planului complex. Vectorul optimal pentru algoritmul ADRC este determinat cu ajutorul AVOA pentru a rezolva problema de optimizare prezentată în (17). Vectorul care urmează să fie optimizat, notat cu  $\theta$  definit în (18), încorporează traiectoriile de referință furnizate în (20) și modelul de proces neliniar al sistemului. Optimizarea bazată pe AVOA generează următoarele valori:

$$\begin{aligned} \theta_{1\text{ADRC1}} &= [-0.3974 \ -25.5647]^T, \theta_{2\text{ADRC1}} = [-0.3273 \ -32.5674]^T, \theta_{3\text{ADRC1}} = [-0.5537 \ -15.1149]^T, \\ \theta_{1\text{ADRC2}} &= [0.3247 \ 88.3241 \ -0.8254]^T, \theta_{2\text{ADRC2}} = [0.1244 \ 64.0227 \ -0.5711]^T, \\ \theta_{3\text{ADRC2}} &= [0.1541 \ 79.2587 \ -0.9574]^T. \end{aligned} \quad (22)$$

Rezultatele sistemului de reglare cu ADRC de ordinul întâi și al doilea sunt reprezentate în fig. 1 a) pentru reglarea axei x, în fig. 1 b) pentru reglarea axei y și în fig. 1 c) pentru reglarea axei x.

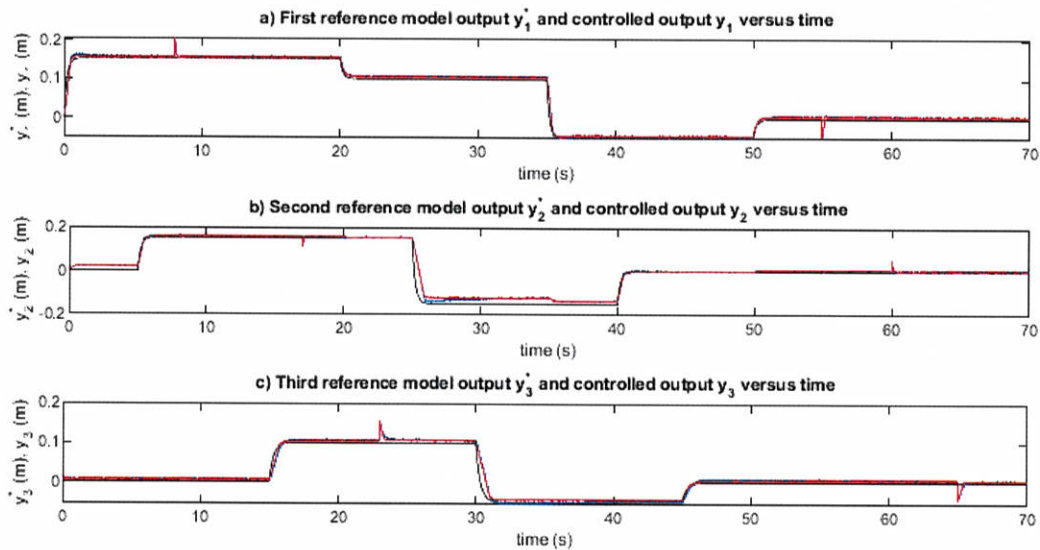


Fig. 1. Rezultatele ieșirii structurii sistemului de reglare cu regulator ADRC de ordinul întâi (albastru) și ADRC de ordinul doi (roșu) pentru a) axa x, b) axa y și c) axa z.

Pentru a pondera influența perturbațiilor aleatorii întâlnite în timpul experimentelor, rezultatele generate în fig. 1 au fost obținute prin medierea a 10 experimente. Valoarea medie a lui  $J_{c,u}$  este de  $3.4091 \cdot 10^{-4}$  și  $3.0095 \cdot 10^{-4}$  pentru algoritmi ADRC de ordinul întâi și al doilea, iar varianța lui  $J_{c,u}$  este de  $1.3244 \cdot 10^{-12}$  și  $8.1514 \cdot 10^{-10}$  pentru algoritmul ADRC de ordinul întâi respectiv al doilea. Această evaluare experimentală urmărește să determine care dintre algoritmi de reglare este mai performant, demonstrând că ambii algoritmi de ADRC se comportă similar, cu un mic avantaj de performanță pentru algoritmul ADRC de ordinul doi. Prin urmare, avantajele ADRC sunt robustețea la perturbații, cunoștințe minime legate de modelul matematic sau simplitatea proiectării, iar limitările ADRC sunt reglarea parametrilor care a fost rezolvată utilizând AVOA.

Algoritmi ADRC de ordinul întâi și doi dezvoltati în 2024 și prezentați anterior sunt importanți în realizarea proiectului întrucât vor fi utilizați direct în domeniul transporturilor.

### Bibliografie aferentă capitolului 1

- [1] Gao, Zhiqiang (2006) “Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design.” In *Proc. 2006 Amer. Control Conf.*, Minneapolis, MN, USA; p. 2399–2405.
- [2] Precup, Radu-Emil, Raul-Cristian Roman, and Ali Safaei (2021) *Data-driven Model-free Controllers, 1<sup>st</sup> Ed.*, CRC Press, Boca Raton, FL.

- [3] Amokrane, Salem-Bilal, Mohammed Zouaoui Laidouni, Touati Adli, Rafal Madonski, and Momir Stanković (2024) “Active disturbance rejection control for unmanned tracked vehicles in leader–follower scenarios: Discrete-time implementation and field test validation.” *Mechatronics* 97: paper 103114, 1–12.
- [4] Li, Zhipeng, Benfei Wang, Liang Xian, Mengfan Zhang, and Qianwen Xu (2024) “Decentralized active disturbance rejection control for hybrid energy storage system in DC microgrid.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* DOI: 10.1109/TIE.2024.3363772: 1–12.
- [5] Cui, Yangyang, Zhonggang Yin, Peien Luo, Dongsheng Yuan, and Jing Liu (2024) “Linear active disturbance rejection control of IPMSM based on quasi-proportional resonance and disturbance differential compensation linear extended state observer.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* DOI: 10.1109/TIE.2024.3352154, 1–15.
- [6] Cao, Haiyang, Yongting Deng, Yuefei Zuo, Hongwen Li, Jianli Wang, Xiufeng Liu, and Christopher H. T. Lee (2024) “Unified interpretation of active disturbance rejection control for electrical drives.” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* DOI: 10.1109/TCSII.2024.3362342, 1–5.
- [7] Kang, Xinyu, Lin Chai, and Huikang Liu (2023) “Anti-swing and positioning for double-pendulum tower cranes using improved active disturbance rejection controller.” *International Journal of Control, Automation and Systems* 21 (4): 1210–1221.
- [8] Wang, Shourui, Wuyin Jin, and Wenke Chen (2024) “A novel payload swing control method based on active disturbance rejection control for 3D overhead crane systems with time-varying rope length.” *Journal of the Franklin Institute* 361 (6): paper 106707, 1–16.
- [9] Roman, Raul-Cristian, Radu-Emil Precup, Emil M. Petriu, Radu-Codrut David, Elena-Lorena Hedrea, and Alexandra-Iulia Szedlak-Stinean (2020) “First-order active disturbance rejection-virtual reference feedback tuning control of tower crane systems.” In *Proc. 24<sup>th</sup> Int. Conf. Syst. Theor. Control Comput.*, Sinaia, Romania; p. 137–142.
- [10] Roman, Raul-Cristian, Mircea-Bogdan Radac, Cornel Tureac, and Radu-Emil Precup (2018) “Data-driven active disturbance rejection control of pendulum cart systems.” In *Proc. 2018 IEEE Conf. Control Technol. Appl.*, Copenhagen, Denmark; p. 933–938.
- [11] Roman, Raul-Cristian, Radu-Emil Precup, and Emil M. Petriu (2021) “Hybrid data-driven fuzzy active disturbance rejection control for tower crane systems.” *European Journal of Control* 58: 373–387.
- [12] Roman, Raul-Cristian, Radu-Emil Precup, Emil M. Petriu, and Anamaria-Ioana Borlea (2024) “Hybrid data-driven active disturbance rejection sliding mode control with tower crane systems validation.” *Romanian Journal of Information Science and Technology* 27: 50–64.

- [13] Fliess, Michel, and Cédric Join (2022) “An alternative to proportional-integral and proportional-integral-derivative regulators: intelligent proportional-derivative regulators.” *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 32 (18): 9612–9524.
- [14] Chang, Lina, and Zhongsheng Hou (2024) “Sampled-data model-free adaptive integral sliding mode control for nonlinear continuous-time networked control systems with fading channels and packet dropouts.” *Neurocomputing* 589: paper 127708, 1–12.
- [15] Formentin, Simone, Marco C. Campi, Algo Care, and Sergio M. Savaresi (2019) “Deterministic continuous-time Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) with application to PID design.” *Systems & Control Letters* 127: 25–34.
- [16] Inteco (2012) *3D Crane, User's Manual*, Inteco Ltd., Krakow.
- [17] Precup, Radu-Emil, Raul-Cristian Roman, Elena-Lorena Hedrea, Emil M. Petriu, and Claudia-Adina Bojan-Dragos (2021) “Data-driven model-free sliding mode and fuzzy control with experimental validation.” *International J Computers Communications & Control* 16: 1–17.
- [18] Abdollahzadeh, Benyamin, Farhad Soleimanian Gharehchopogh, and Seyedali Mirjalili (2021) “African vultures optimization algorithm: a new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems.” *Computers & Industrial Engineering* 158: 1–37.
- [19] Precup, Radu-Emil, Elena-Lorena Hedrea, Raul-Cristian Roman, Emil M. Petriu, Claudia-Adina Bojan-Dragos, Alexandra-Iulia Szedlak-Stinean, and Flavius-Catalin Paulescu (2022) “AVOA-based tuning of low-cost fuzzy controllers for tower crane systems.” *In Proc. 2022 IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, Padua, Italy; p. 1–8.

## 2. Sumarul progresului (livrabile realizate, indicatori de rezultat, diseminarea rezultatelor, justificare diferențe, dacă e cazul)

**Etapa 1** din cadrul acestui proiect a fost reprezentată de colectarea datelor și determinarea modelului comportamental al transportului intermodal. Rezultatele obținute sunt:

- documentația referitoare la coordonarea proiectului, gestionarea riscurilor și procedurile de asigurare a calității;
- modele de comportament al transferului intermodal utilizând datele colectate referitoare la comportamentul conducătorilor auto;
- rapoarte referitoare la comunicarea și diseminarea rezultatelor obținute în prima etapă a proiectului.

Activitățile desfășurate în anul 2024 în cadrul acestui proiect sunt enumerate în continuare:

- **Activitatea 1.1** din cadrul acestui proiect pe anul 2024 a fost întocmirea unei documentații referitoare la coordonarea proiectului, gestionarea riscurilor și procedurile de asigurare a calității, iar ca și rezultat realizat a fost dezvoltarea experimentală. Această activitate a fost coordonată de către UPT.

- **Activitatea 1.2** din cadrul acestui proiect pe anul 2024 a fost colectarea datelor comportamentale referitoare la conducătorii auto și dezvoltarea modelelor de comportament al transportului intermodal. Această activitate a fost coordonată de către UPT.

- **Activitatea 1.3** din cadrul acestui proiect pe anul 2024 a fost comunicarea și diseminarea rezultatelor obținute în această etapă a proiectului. Această activitate a fost realizată de către UPT.

Managementul proiectului a fost orientat către atingerea obiectivelor stabilite și îmbunătățirea comunicării între partenerii implicați. UPT a avut un rol central în coordonarea activităților, facilitând colaborarea eficientă și asigurându-se că activitățile desfășurate sunt în strânsă concordanță cu obiectivele proiectului. Activitățile desfășurate în 2024 de către UPT au fost realizate cu sprijinul partenerilor internaționali PolyU-SZRI, ZJU și CTH, fiecare contribuind cu expertiza lor specifică. De asemenea UPT a pregătit terenul pentru etapele următoare prin publicarea diverselor tehnici de reglare [C1]-[C10] care să fie validate pe modelul de trafic.

În cadrul **activității 1.1**, UPT a realizat o documentație internă detaliată care vizează coordonarea proiectului, gestionarea riscurilor și asigurarea calității, contribuind la asigurarea unei structuri clare de lucru pentru toți partenerii implicați. Acest efort a fost esențial pentru stabilirea unei direcții comune și pentru gestionarea eficientă a riscurilor potențiale care ar putea afecta derularea proiectului. Partenerii PolyU-SZRI și CTH au furnizat contribuții valoroase prin consultanță în ceea ce privește riscurile asociate proiectelor internaționale, aducând o perspectivă globală asupra celor mai bune practici de asigurare a calității. Acest lucru a permis UPT să își îmbunătățească procedurile interne și să asigure o implementare eficientă a activităților. Această

activitate a fost realizată în cadrul pachetului de lucru (Work Package-ului) WP 6 din propunerea de proiect.

În cadrul **activității 1.2**, UPT a fost responsabilă pentru colectarea datelor comportamentale ale conducătorilor auto și pentru dezvoltarea modelelor de comportament care să descrie interacțiunile dintre modurile de transport în mediul urban. Tot în cadrul acestei etape au fost propuși algoritmi de tip data-driven [C2], [C8], [C10] alături de alți algoritmi de reglare, în speță reglare bazată pe învățare prin reîntărire adaptivă (reinforcement learning-based control) [C1], bazată pe formalismul tensorial [C4], [C7], reglare fuzzy cu dinamică de tip proporțional-integrator [C5], [C9], o abordare nouă de reglare bazată pe hamiltonian [C6], care vor fi ulterior validați pe modelul matematic cu scopul de a spori eficiența energetică, sprijinind în mod direct mobilitatea neutră din punct de vedere climatic. De asemenea a fost propusă și o metodă de determinare a modelului matematic de tip Statistical Computational Model [C3]. Această activitate a inclus utilizarea datelor din studii comportamentale pentru a crea modele predictive care să informeze deciziile de proiectare a sistemelor de transport intermodal. Echipa de la ZJU a contribuit substanțial la această activitate, oferind suport tehnic pentru algoritmi de analiză a datelor și asistență în aplicarea metodelor de învățare automată pentru a analiza comportamentul șoferilor. De asemenea, CTH a sprijinit modelarea comportamentală prin furnizarea de cunoștințe în domeniul științei comportamentale și metode de evaluare a impactului asupra accesibilității și rezilienței sistemelor de transport. Aceste colaborări au permis UPT să pregătească dezvoltarea modelelor matematice exacte și relevante, care să fie utilizate pentru a îmbunătăți proiectarea și funcționarea transportului intermodal. Această activitate a fost realizată în cadrul WP 5 din propunerea de proiect.

În cadrul **activității 1.3**, UPT a jucat un rol cheie în diseminarea rezultatelor obținute și publicate în [C1]-[C10]. Echipa UPT a organizat sesiuni de comunicare, a participat la conferințe și a diseminat rezultatele prin publicații științifice. Prin aceste eforturi, rezultatele proiectului au fost aduse la cunoștința comunității științifice, a autorităților publice și a altor părți interesate. Un alt lucru adus în plus a fost achiziționarea software-ului CarSim pentru simulări ulterioare și pregătirea pentru diseminarea rezultatelor viitoare. Partenerii de la PolyU-SZRI au oferit suport logistic pentru evenimentele de diseminare, facilitând accesul la o audiență internațională mai largă. De asemenea, partenerii au sprijinit adaptarea materialelor de diseminare pentru a se asigura că sunt accesibile și relevante pentru diversele contexte culturale și lingvistice. Prin colaborarea cu FellowBot, UPT a beneficiat de soluții digitale inovatoare pentru prezentarea și promovarea rezultatelor, ceea ce a crescut impactul și vizibilitatea proiectului. Această activitate a fost realizată în cadrul WP 6 din propunerea de proiect.

UPT a coordonat WP 4 din propunerea de proiect, iar în momentul de față UPT coordonează dezvoltarea unui cadru de conducere adaptivă și control adaptiv și abordări pentru optimizarea vitezei și gestionarea consumului de energie în contextul vehiculelor electrice autonome. În prezent UPT lucrează la dezvoltarea unui model matematic complex care să permită reglarea optimală a autovehiculelor autonome conectate, cu accent asupra autobuzelor electrice autonome conectate, în cadrul unui scenariu realist care are în vedere dinamica variabilă a traficului urban, prezența autovehiculelor conduse manual și utilizarea eficientă a resurselor energetice. Partenerii de la CTH și ZJU au furnizat expertiză în utilizarea algoritmilor de învățare

automată și tehnici de optimizare avansate, ceea ce permite îmbunătățirea modelului dezvoltat de UPT.

Echipa de la CQU va contribui în perioada următoare prin furnizarea de date reale despre baterii, ajutând la calibrarea modelului de uzură și la optimizarea performanței termice a bateriilor. În plus, FellowBot va sprijini implementarea unor simulări avansate și demonstrații virtuale, facilitând evaluarea și testarea în scenarii realiste.

UPT a demonstrat și demonstrează în continuare calități de coordonare și adaptare, asigurându-se că fiecare etapă a proiectului avansează conform planului. Cooperarea cu partenerii internaționali a fost și este esențială pentru a depăși provocările tehnice și culturale, permițând UPT să proiecteze și să îmbunătățească constant modelele și metodele utilizate. Prin aceste eforturi, proiectul contribuie semnificativ la avansarea cunoștințelor în domeniul mobilității sustenabile și a infrastructurii urbane reziliente.

**Rezultatele principale** obținute de UPT în cadrul proiectului în această etapă, inclusiv **diseminarea rezultatelor**, depășesc rezultatele prevăzute. Acestea sunt:

- Raport de cercetare.
- Zece lucrări publicate: [C1]-[C10], cu informații bibliografice și scientometrice specificate în capitolul 4 al acestui raport.
- Detalii privind lucrările publicate: 5 lucrări [C1]-[C5] publicate în reviste indexate în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge) cu factor de impact, o lucrare [C6] publicată în volum de conferință indexată în Clarivate Analytics Web of Science (cu unele din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge sau ISI Proceedings), 2 lucrări [C9] și [C10] publicate în volume de conferință indexate în baze de date internaționale (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus, DBLP), 2 capitole de carte [C7], [C8] publicate în Springer.
- Rezultatele proiectului au fost promovate prin cinci prelegeri plenare invitate susținute de prof.dr.ing. Radu-Emil Precup la conferințe și seminarii internaționale și specificate în capitolul 4 al acestui raport.
- **Factorul de impact cumulat al lucrărilor publicate și acceptate pentru a fi publicate conform 2023 Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2024 este 26.1.**
- **Lucrarea [C2] are statut de Highly Cited Paper în lunile iulie-august 2024 conform Clarivate Analytics Web of Science.**
- Revistele cu factor de impact ridicat în care au fost publicate sau au fost acceptate pentru a fi publicate lucrările sunt: Applied Soft Computing (Elsevier), Romanian Journal of Information Science and Technology (Romanian Academy, Section for Information

Science and Technology), Acta Polytechnica Hungarica, Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering (University of Nis).

- Capitolele de carte cu vizibilitate ridicată au fost publicate în editura Springer.
- Conferințele cu vizibilitate ridicată în volumele cărora au fost publicate lucrările sunt IEEE 18<sup>th</sup> International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2024, 2024 International Semiconductor Conference CAS 2024 și 11<sup>th</sup> International Conference on Information Technology and Quantitative Management ITQM 2024.



### 3. Rezumatul executiv al activităților realizate în perioada de implementare

Echipa de cercetare care a desfășurat activități de cercetare în cadrul proiectului “Sisteme de Transport Intermodale pentru Îmbunătățirea Conectivității și Accesibilității Urbane”, contract de finanțare pentru execuție proiecte nr. 9 / 2024, codul de depunere ERANET-ENUAC-e-MATS, este cea nominalizată în cererea de finanțare: prof.dr.ing. Radu-Emil Precup (director de proiect), conf.dr.ing. Claudia-Adina Bojan-Dragoș, ș.l.dr.ing. Adriana Albu, ș.l.dr.ing. Alexandra-Iulia Szedlak-Stînean, s.l.dr.ing. Raul-Cristian Roman, as.dr.ing. Elena-Lorena Hedrea, conf.dr.ing. Anamaria Feier, drd.inf. Miruna Maria Damian, drd.ing. Monica Nedelcea, drd.ing. Alexandru-Marian Chiru, ec. Adina-Elena Ivoniciu, ing. Ioana Brazdău, ing. Agnes Stepanian, mat. Nicolina Adamescu, ing. Claudia Micea, ec. Casandra Cesărean Plesnecute, ing. Loredana Coroban.

Universitatea Politehnica Timișoara (UPT) colaborează în cadrul acestui proiect cu Chalmers University of Technology (CTH), Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Zhejiang University (ZJU), The Hong Kong Polytechnic University Shenzhen Research Institute (PolyU-SZRI), Chongqing University (CQU), WSP Sverige AB, FellowBot AB, Hangzhou Comprehensive Transportation Center (HZCTC, cooperation partner) și Enjoyor Ltd Co. (cooperation partner). UPT coordonează partenerii din Europa, în strânsă colaborare (coordonare) cu CTH. Coordonarea pentru partenerii din China este asigurată de ZJU.

Activitatea 1.1 a fost întocmirea unei documentații referitoare la coordonarea proiectului, gestionarea riscurilor și procedurile de asigurare a calității, iar ca și rezultat realizat a fost dezvoltarea experimentală. Activitatea 1.2 a fost colectarea datelor comportamentale referitoare la conducătorii auto și dezvoltarea modelelor de comportament al transportului intermodal. Activitatea 1.3 a fost comunicarea și diseminarea rezultatelor obținute în această etapă a proiectului.

Activitățile 1.1 și 1.2 au fost coordonate de către UPT. Activitatea 1.3 a fost realizată de către UPT. UPT a colaborat foarte bine cu partenerii și excelent cu CTH.

Rezultatele principale obținute de UPT în cadrul proiectului în această etapă depășesc rezultatele prevăzute. Rezultatele au fost diseminate prin publicarea a cinci lucrări în reviste din domeniu cu factor de impact ridicat, prin publicarea a două capitole de carte cu vizibilitate ridicată și prin participarea și prezentarea a trei lucrări în cadrul unor conferințe cu vizibilitate ridicată.

Factorul de impact cumulativ al lucrărilor publicate și acceptate pentru a fi publicate conform 2023 Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2024 este 26.1.

O lucrare are statut de Highly Cited Paper în lunile iulie-august 2024 conform Clarivate Analytics Web of Science.

Rezultatele proiectului au fost promovate prin cinci prelegeri plenare invitate susținute de prof.dr.ing. Radu-Emil Precup la conferințe și seminarii internaționale.

Adresa paginii web a proiectului este: <https://www.aut.upt.ro/~rprecup/e-MATS.html>. Adresa paginii de web cu informații și diseminare la JPI Urban Europe (organizația care a organizat competiția) este: <https://jpi-urbaneurope.eu/project/e-mats/>.

#### 4. Bibliografie proprie (UPT)

- [C1] I. A. Zamfirache, R.-E. Precup (corresponding author) and E. M. Petriu, Adaptive reinforcement learning-based control using proximal policy optimization and slime mould algorithm with experimental tower crane system validation, *Applied Soft Computing* (Elsevier), vol. 160, paper 111687, pp. 1-15, 2024, impact factor (IF) = 7.2, IF according to 2023 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2024 = 7.2, Q1 quartile, Article Influence Score (AIS) = 1.282.
- [C2] R.-C. Roman, R.-E. Precup (corresponding author), E. M. Petriu and A.-I. Borlea, Hybrid Data-Driven Active Disturbance Rejection Sliding Mode Control with Tower Crane Systems Validation, *Romanian Journal of Information Science and Technology* (Romanian Academy, Section for Information Science and Technology), vol. 27, no. 1, pp. 50-64, 2024, impact factor (IF) = 3.7, IF according to 2023 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2024 = 3.7, Q1 quartile, Article Influence Score (AIS) = 0.462. The paper has received Highly Cited Paper status according to Clarivate Analytics Web of Science in July/August 2024.
- [C3] S. Travin, O. B. Gromov, G. Duca and R.-E. Precup (corresponding author), Statistical Computational Model of Fission Products Composition of Irradiated Nuclear Fuel and Their Contribution to Gas-aerosol Emissions of Nuclear Power Plants, *Romanian Journal of Information Science and Technology* (Romanian Academy, Section for Information Science and Technology), vol. 27, no. 3-4, pp. 310-322, 2024, impact factor (IF) = 3.7, IF according to 2023 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2024 = 3.7, Q1 quartile, Article Influence Score (AIS) = 0.462.
- [C4] C. Pozna, R.-E. Precup and A. Ballagi, Using Tensor-Type Formalism in Causal Networks, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 21, no. 10, pp. 75-91, 2024, impact factor (IF) = 1.4, IF according to 2023 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2024 = 1.4, Q2 quartile, Article Influence Score (AIS) = 0.151.
- [C5] R.-E. Precup, R.-C. Roman, E.-L. Hedrea, E. M. Petriu, C.-A. Bojan-Dragos and A.-I. Szedlak-Stinean, Metaheuristic-based tuning of proportional-derivative learning rules for proportional-integral fuzzy controllers in tower crane system payload position control, accepted, to be published in *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering* (University of Nis), vol. 22, no. 4, pp. 1-16, 2024, DOI: 10.22190/FUME240914044P, impact factor (IF) = 10.1, IF according to 2023 Journal Citation Reports (JCR) released by Clarivate Analytics in 2024 = 10.1, Q1 quartile, Article Influence Score (AIS) = 0.850.
- [C6] C. Pozna, R.-E. Precup and A. Ballagi, Hamiltonian-Based Control Approach with Pendulum Application, *Proceedings of IEEE 18<sup>th</sup> International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2024*, Siófok, Ungaria, and Timișoara, Romania, pp. 593-598, 2024, indexed in Clarivate Analytics Web of Science.
- [C7] C.-R. Pozna, R.-E. Precup (corresponding author) and A. Ballagi, Tensor-Based Approach to Diagnostic Causal Network Modeling, in: *Recent Advances in Intelligent Engineering*, L. Kovacs, T. Haidegger and A. Szakal, Eds. *Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, vol. 18, Springer, Cham, pp. 119-137, 2024, indexed in Link Springer.

- [C8] R.-C. Roman, E.-L. Hedrea, R.-E. Precup (corresponding author), C.-A. Bojan-Dragoș and A.-I. Szedlak-Stînean, Iterative Feedback Tuning Algorithms for Two Rotor Aerodynamic Systems, in: Decision Making and Decision Support in the Information Era, V. E. Balas, G. Dzemyda, S. Belciug and J. Kacprzyk, Eds., Studies in Systems, Decision and Control, vol. 534, Springer, Cham, pp. 337-364, 2024, indexed in Link Springer.
- [C9] A.-I. Szedlak-Stinean, R.-E. Precup and N.-L. Iancu, Classical and Fuzzy Controllers for an Optimally Tuned Model of a Strip Winding System, Proceedings of 2024 International Semiconductor Conference CAS 2024, Sinaia, Romania, pp. 13-22, 2024, indexed in IEEE Xplore.
- [C10] R.-C. Roman, R.-E. Precup and E. M. Petriu, Active Disturbance Rejection Control for 3D Crane Systems, 11<sup>th</sup> International Conference on Information Technology and Quantitative Management (ITQM 2024), Procedia Computer Science, vol. 242, pp. 976-983, 2024, indexed in Scopus.

### **Prelegeri plenare invitate susținute la conferințe și seminarii internaționale**

- [1] R.-E. Precup, Metaheuristic Algorithms and their Applications to Fuzzy Control, Fuzzy Modeling and Learning-based Control, 9th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications COIA 2024, Istanbul, Turkey, 2024.
- [2] R.-E. Precup, Applications of metaheuristic algorithms to fuzzy control and model building, learning-based control, and mobile robot navigation, 15th European Symposium on Computational Intelligence and Mathematics ESCIM 2024, Krakow, Poland, 2024.
- [3] R.-E. Precup, Metaheuristic Algorithms and Their Application to Fuzzy Control, Fuzzy Modeling, Mobile Robot Navigation, and Finger Dynamics for Prosthetic Hand Myoelectric-Based Control, 2024 6th International Conference on Robotics and Computer Vision ICRCV 2024, Wuxi, China, 2024.
- [4] R.-E. Precup, Model-based and model-free low-cost fuzzy controllers, International Seminar on Computational Intelligence ISCI'2024, Tijuana, Mexico, 2024.
- [5] R.-E. Precup, Evolving Fuzzy Models and Transportation Applications, International Semiconductor Conference CAS 2024, Sinaia, Romania, 2024.

**Director Proiect,**  
Prof.dr.ing. Radu-Emil Precup

