



Universitatea Politehnica Bucureşti
Facultatea de Automatică și Calculatoare
Departamentul de Automatică și Ingineria Sistemelor

LUCRARE DE LICENȚĂ

Control PID multi-variabil metaheuristic al unei
instalații hidraulice.

Absolvent
Alexandru-Valentin Molete

Coordonator
Prof. Dr. Ing. Dan Ștefănoiu
Conf. Dr. Ing. Janetta Culiță

Bucureşti, 2021

CUPRINS

1. Introducere	2
2. Instalația hidraulică ASTANK2	3
2.1. Caracteristicile tehnice ale instalației	3
2.2. Modelul liniar de identificare.....	4
3. Algoritmul liliencilor.....	6
3.1. Principiu	6
3.2. Modelul informatic al liliencilor artificiali.....	7
4. Controlul instalației hidraulice	12
4.1. Descrierea generală a regulatorului PID	12
4.2. Regulatorul PID multi-variabil.....	14
4.3. Implementarea structurii de control în MATLAB-SIMULINK™	16
5. Analiza rezultatelor de simulare	19
5.1. Utilizarea Algoritmului Liliencilor în determinarea PID optimal	19
5.2. Definirea criteriului de optimizare și determinarea regulatorului optimal	20
5.3. Testarea regulatorului PID optimal.....	28
5.3.1. Vecinătatea de bună funcționare a regulatorului.....	28
5.3.2. Capacitatea de reacție a perturbațiilor accidentale pe ieșiri	32
5.3.3. Capacitatea de reacție a perturbațiilor persistente pe ieșiri.....	35
5.3.4. Capacitatea de urmărire a unor referințe în scară	36
6. Concluzii și perspective	38
7. Contribuții originale ale studentului.....	38
Bibliografie.....	39

1. Introducere

Cu toate că există o varietate de strategii avansate de control pe bază de: model predictiv optimal, adaptiv, neural-fuzzy etc. [ŞtCu-21], în domeniul Automaticii, structurile de control PID, *Proportional-Integativ-Derivativ*, sunt în continuare utilizate, datorită simplității, stabilității, fiabilității și performanțelor bune oferite în buclă închisă. Problema principală întâlnită în proiectarea regulatoarelor PID este dată de acordarea precisă și eficientă a parametrilor lui. Aceasta este o sarcină dificilă atunci când trebuie controlate procese industriale modelate ca sisteme cu mai multe intrări și ieșiri, prezentând, de asemenea, o dinamică neliniară [ŞtCu-21].

Pentru a determina regulatorul PID optim, se propune rezolvarea unei probleme de optimizare alcătuită din mai multe necunoscute și constrângeri [ŞtCu-21] [WAN-20]. Cu toate că nu există o metodologie clară de a defini funcția cost de optimizare [ŞtCu-21], majoritatea se bazează pe variația erorii de urmărire. În această lucrare, criteriul de optimizare este definit în aşa fel încât să se asigure deopotrivă buna urmărire a referințelor și comenzi cât mai netede, în jurul unui punct static de funcționare a procesului.

Se folosesc două categorii principale de tehnici de optimizare pentru proiectarea regulatoarelor PID optimale. Prima este reprezentată de metode de optimizare tradiționale, exacte, fiind aplicate în contextul teoriei de control liniar sau neliniar. A doua are legătură cu *metaeuristicile*. Acestea sunt bazate, în principal, pe Inteligență Artificială [WAN-20] și fac parte din ramura programării evoluționare. În ultimele două decenii, metaeuristicile au devenit din ce în ce mai utilizate în diverse domenii de cercetare, inclusiv în Ingineria Reglării Automate, datorită capacitatii lor de a găsi soluții optime apropiate de cele globale, în spații de căutare cu mai multe dimensiuni [ŞtCu-21]. De asemenea, acestea găsesc soluțiile optimale fără a fi necesară o capacitate mare de calcul și oferă un compromis bun între multiple obiective de performanță [ŞtCu-21] [WAN-20]. Multe metaeuristici s-au construit pe baza comportamentului natural al unor ființe, precum insectele sau animalele [ŞtCu-21] [ŞTE-14].

În această lucrare, se adoptă strategia de control bazată pe un regulator PID multi-variabil, cu două intrări și două ieșiri, pentru reglarea instalației hidraulice ASTANK2 [CuŞtDu-15], din dotarea laboratorului CAMPUS. Strategia este proiectată și implementată pornind de la modele de identificare propuse în [ŞtCu-20]. De aici rezultă că regulatorul este alcătuit din trei matrice pătratice cu dimensiunea egală cu doi. Pentru a găsi cei doisprezece parametri optimali, se utilizează metaeuristica bazată pe comportamentul liliencilor, numită *Algoritmul Liliencilor* [ŞTE-14].

Această lucrare este structurată în cinci părți. În prima parte, sunt descrise succint instalația hidraulică ASTANK2 și modelele de identificare ale acesteia. În a doua parte, se detaliază Algoritmul Liliencilor, împreună cu câteva detalii de implementare. În partea a treia, se realizează o descriere a regulatorului PID multi-variabil și construirea diagramei de simulare a sistemului în buclă închisă. Partea a patra este dedicată formulării problemei de optimizare și utilizării Algoritmului Liliencilor pentru a determina o soluție optimă. În ultima parte, se analizează capabilitățile și limitările regulatorului optim găsit în secțiunea anteroară. Aici, sistemul în buclă închisă este testat în cadrul mai multor scenarii. Astfel, mai întâi, se determină empiric vecinătatea de liniaritate din jurul punctului static pentru care regulatorul funcționează

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

corect. Apoi, se analizează capacitatea de reacție a perturbațiilor accidentale și persistente pe ieșiri, precum și capacitatea de urmărire a unor referințe în scară.

2. Instalația hidraulică ASTANK2

2.1. Caracteristicile tehnice ale instalației

Instalația ASTANK2, din dotarea laboratorului CAMPUS [CuStDu-15], reprezintă un sistem hidraulic alcătuit din două rezervoare, de înălțimi egale, aşa cum ilustrează Figura 2.1:

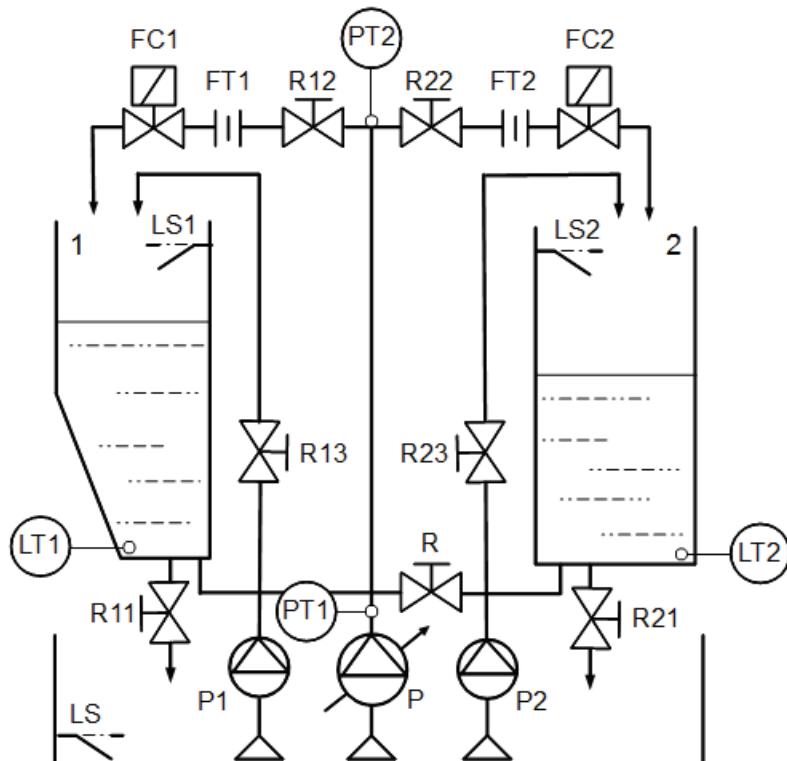


Figura 2.1. Sistemul hidraulic ASTANK2 (laboratorul CAMPUS) [CuStDu-15]

Rezervoarele sunt umplute cu apă de la un al treilea vas, cu rol de acumulare, prin intermediul unei rețele de pompare. Acestea pot fi cuplate prin intermediul unei conducte amplasată la baza lor, sau administrate separat, în funcție de poziția robinetului actionat manual, R. Scurgerea apei este afectată de închiderea sau deschiderea robinetelor R11 și R21. Prin urmare, procesul este configurabil și conectivitatea rezervoarelor oferă o gamă largă de experimente.

Din punct de vedere al geometriei, există o diferență între cele două rezervoare. Primul, cel din stânga, are o secțiune variabilă, din cauza peretelui înclinat, care introduce neliniaritate în dinamica procesului. Al doilea rezervor, din partea dreaptă, este un paralelipiped obișnuit, cu o dinamică de umplere/golire cvasi-liniară.

Nivelul de apă din fiecare rezervor superior este măsurat folosind traductori de nivel: LT1, respectiv, LT2. Senzorii de nivel LS1 și LS2 trimit semnale care indică dacă apa s-a revărsat sau nu din rezervor, în timp ce senzorul de nivel LS monitorizează

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

limita inferioară a nivelului de apă în vasul de acumulare, pentru a preveni ca pompa principală P să absoarbă doar aer.

Pompa principală P are rolul de a distribui apa din vasul de acumulare în sistem prin intermediul conductei verticale din mijloc și funcționează la tensiunea cuprinsă între 0 și 10 V. Debitul și presiunea pot fi alese adaptiv, prin controlul frecvenței de alimentare. Conducta verticală este ramificată la nivelul superior. Presiunea lichidului la punctele de vărsare și ramificare este monitorizată de traductoarele de presiune PT1 și PT2. Cel de-al doilea poate trimite și semnale de urgență atunci când cantitatea de apă este insuficientă pentru a umple simultan conductele ramificate. La nivelul tuburilor orizontale, se află două traductoare de debit: FT1 și FT2. Acestea măsoară debitele de intrare în rezervoare, fiind controlate de electrovalvele FC1 și FC2. Ultimele două componente permit variația debitului prin ajustarea voltajului. Tensiunea acestora poate varia între 0 și 10 V.

Sistemul principal de pompare este completat de două pompe auxiliare, P1 și P2, care permit adăugarea unui volum suplimentar de lichid la fiecare rezervor prin conducte verticale secundare. Pompele auxiliare asigură un debit constant prin conducte și au fost adăugate pentru a introduce eventuale perturbații în procesul de umplere sau golire. În final, robinetele manuale R13 și R23 pot modifica debitul perturbator din conducte.

Așadar, nivelele de apă din cele trei rezervoare reprezintă parametrii măsuiați ai sistemului, care depind de următoarele intrări posibile: voltajul aplicat pe fiecare electrovalvă, voltajul aplicat pe pompa principală și activarea sau dezactivarea pompelor secundare.

2.2. Modelul liniar de identificare

În cadrul acestei lucrări, se consideră că instalația hidraulică este reprezentată de un sistem neliniar MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*, cu două canale de intrare și două de ieșire [CuŞt-17]. Intrările sunt tensiunile u_1 și u_2 ale celor două electrovalve. Ieșirile sunt nivelurile de apă din cele două rezervoare superioare, h_1 și h_2 . Totodată, voltajul pompei principale, P, rămâne constant, pentru a proteja de variații brusăte sau socuri.

Pentru modelarea procesului, se alege un model de identificare MIMO de tip *Box-Jenkins*, cunoscut și sub numele de *Filtered-Input Filtered-Noise* [CuŞt-17]. Schema generală al acestui model este:

$$\begin{cases} y_{[n]} = \frac{B_{(q^{-1})}}{A_{(q^{-1})}} u_{[n]} + \frac{C_{(q^{-1})}}{D_{(q^{-1})}} e_{[n]}, \forall n, m \in \mathbb{N}. \\ E\{e_{[n]} e_{[m]}\} = \lambda^2 \delta_{0[n-m]} \end{cases} \quad (2.1)$$

Pentru identificarea sistemului MIMO, se aleg două sisteme MISO, *Multiple-Input Single-Output*, corespunzătoare fiecărui canal de ieșire, y_1 și y_2 , numite MISO₁ și MISO₂, conform datelor experimentale din [ŞtCu-21]. Diagrama acestui proces este ilustrată în Figura 2.2.

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

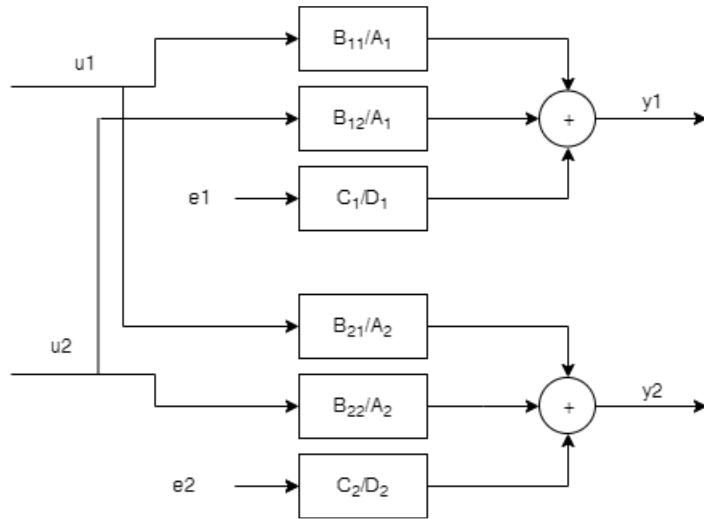


Figura 2.2. Schema de identificare globală a instalației ASTANK2 [ŞtCu-21]

Un model MISO include trei filtre. Fiecare intrare stimulează două filtre liniare raționale de forma B/A. Un filtru de zgromot liniar tot rațional, de tipul C/D, modifică fiecare ieșire, după procesarea a două zgomite albe Gaussiene necorelate, e_1 și e_2 . Pentru fiecare canal de ieșire, y_j ($j \in \{1,2\}$), modelul MISO se bazează pe polinoamele A_j , B_{j1} , B_{j2} , C_j și D_j , de ordine na_j , nb_{j1} , nb_{j2} , nc_j , respectiv nd_j și întârzieri intrinseci nk_{j1} , respectiv nk_{j2} , conform sistemului de ecuații de mai jos:

$$\begin{cases} A_j(q^{-1}) &= 1 + a_{1,j}q^{-1} + \dots + a_{na_j,j}q^{-na_j} \\ B_{j1}(q^{-1}) &= q^{1-nk_{j1}}(b_{1,j1}q^{-1} + b_{2,j1}q^{-2} + \dots + b_{nb_{j1},j1}q^{-nb_{j1}}) \\ B_{j2}(q^{-1}) &= q^{1-nk_{j2}}(b_{1,j2}q^{-1} + b_{2,j2}q^{-2} + \dots + b_{nb_{j2},j2}q^{-nb_{j2}}), j \in \{1,2\}. \\ C_j(q^{-1}) &= 1 + c_{1,j}q^{-1} + \dots + c_{nc_j,j}q^{-nc_j} \\ D_j(q^{-1}) &= 1 + d_{1,j}q^{-1} + \dots + d_{nd_j,j}q^{-nd_j} \end{cases} \quad (2.2)$$

Două tipuri de date experimentale au fost propuse pentru identificarea modelelor BJ. Primul set este obținut direct de la senzori și cel de-al doilea set este dobândit din prelucrarea datelor de la senzori prin intermediul unui model *spline* cubic stocastic optimal [ŞtCu-20]. În ambele cazuri, structura optimă a modelelor BJ a fost obținută prin intermediul unui algoritm metaeuristic, numit *Advanced Hill Climbing*, care maximizează raportul semnal-zgomot (SNR) al modelului de identificare, [ŞtCu-20]. Tabelul 2.1 arată indicii structurali fiecărui subsistem optimal MISO pentru ambele seturi de date, cu $nk_{j1} = nk_{j2} = 1$, precum și dispersiile zgomotelor albe Gaussiene:

Tabelul 2.1. Indicii structurali pentru modelele MISO BJ și dispersiile estimate de zgromot

Canal	Tipul de date de ieșire	Indicii optimali (na, nb_1, nb_2, nc, nd)	Dispersia zgromotului (λ^2)
1	Direct	(30,22,16,65,0)	0,0067
1	Prelucrat	(3,21,47,89,0)	0,006
2	Direct	(27,7,26,95,0)	0,006
2	Prelucrat	(2,2,46,95,0)	0,0063

Acet tabel sugerează că, folosind datele prelucrate, modelele prezintă mai puțini poli decât cele obținute din datele dobândite direct. Diferența de poli este subliniată de primul indice structural, n_a . Așadar, pentru simularea procesului, se aleg modelele obținute din datele prelucrate, deoarece oferă performanțe mai bune în bucla de reacție.

Conform analizei din [ŞtCu-21], instalația tehnică prezintă unele limitări, care devin constrângeri în cadrul proiectării regulatorului. Acestea sunt următoarele:

- tensiunile electrovalvelor se saturează la 2 și 10 V; sub 2 V, acestea nu mai reacționează, iar peste 10 V, acestea se pot distruga;
- nivelurile de apă din oricare rezervor pot varia doar între 0 și 15 cm;
- pentru a evita saturații îndelungate de voltaj pe electrovalve, diferența absolută dintre referințele de nivel, $|y_{1,ref} - y_{2,ref}|$, este mărginită la 2 cm;
- pentru a proteja electrovalvele împotriva defectării premature, niciun voltaj nu poate sări de la valoarea curentă la următoarea cu mai mult de 3 V sau cu mai puțin de -3 V.

3. Algoritmul liliecilor

3.1. Principiu

În esență, liliecii se hrănesc cu insecte, după ce le-au detectat prin ecolocație. Aceștia generează ultrasunete și, în funcție de direcția și intensitatea semnalelor recepționate, pot localiza cu precizie posibila pradă. Mai mult, liliecii au capacitatea de a deosebi rapid prăzile de obstacole în timpul zborului.

Conform biologilor, comportamentul general al liliecilor poate fi descris astfel:

- La început, liliacul zboară orbește, în spațiul vital, prin generarea unor serii de impulsuri ultrasonice cu o anumită amplitudine și perioadă.
- Între aceste serii, liliacul recepționează prin ecolocație semnalele returnate, ale acestuia și ale altora din stol, dacă este cazul.
- Decodificarea semnalelor recepționate se realizează instantaneu. Dacă aceste semnale au intensitatea slabă și/sau perioadă mare, atunci, o posibilă pradă este detectată și, după localizarea ei, liliacul începe să zboare în acea direcție. Explicația acestui fenomen este următoarea: prada reprezintă un absorbant de ultrasunete, care scade intensitatea semnalelor returnate; simultan, prada primește ultrasunete de la o varietate de lilieci și, prin urmare, densitatea semnalului crește.
- Pe măsură ce liliacul se apropi de pradă, densitatea impulsurilor ultrasonice crește gradual, în timp ce intensitatea scade gradual.
- Dacă semnalele recepționate au perioada foarte slabă, liliacul continuă să zboare orbește, fără a schimba amplitudinea și perioada ultrasunetelor transmise.
- Distanța până la pradă se estimează prin variația frecvenței ultrasunetelor de-a lungul unei lungimi mari de undă. Prin urmare, folosind efectul Doppler, liliacul poate localiza cu precizie prada, chiar și în timpul zborului. De asemenea, liliacul poate controla și adapta viteza zborului.

Algoritmul liliecilor a fost propus de Xin-She Yang [ŞTE-14].

3.2. Modelul informatic al liliacilor artificiali

Fie C o mulțime de P liliaci care caută hrana. Se notează prin $k \in \mathbb{N}$ indexul de iterare corespunzător algoritmului de optimizare. Atunci, modelul propagării micro-undelor într-un mediu poate fi folosit pentru a exprima viteza de zbor a liliacului $p \in \overline{P}$ prin ecuația recursivă de mai jos:

$$\mathbf{v}_p^{k+1} = \mathbf{v}_p^k + (\mathbf{x}_C^{opt,k} - \mathbf{x}_p^k) \varphi_p^k, \quad (3.1)$$

unde $\mathbf{x}_C^{opt,k}$ este poziția optimă curentă din mulțimea C , \mathbf{x}_p^k este poziția curentă a liliacului și φ_p^k este frecvența curentă a ultrasunetului pe care liliacul o generează.

Această frecvență se actualizează printr-o ecuație care ia în calcul limitările biologice ale liliacului, mai exact frecvențele minime și maxime ale ultrasunetului transmis: φ_p^{\min} și φ_p^{\max} :

$$\varphi_p^k = (1 - \beta_p^k) \varphi_p^{\min} + \beta_p^k \varphi_p^{\max}. \quad (3.2)$$

În mod normal, parametrul $\beta \in [0,1]$ ar trebui setat conform caracteristicilor biologice ale liliacului. Din nefericire, acest model este dificil de identificat. Așadar, acest parametru este selectat aleatoriu, nefiind departe de realitate, pentru că liliacul își schimbă frecvența tot timpul, de cele mai multe ori din instinct. Doar atunci când prada este detectată, frecvența se modifică sistematic.

Limitele de frecvență nu sunt mai mici de 25 kHz sau mai mari de 150 kHz, pentru majoritatea tipurilor de liliaci. Foarte puțini liliaci sunt capabili să depășească limita superioară de 150 kHz, dar unii dintre ei pot atinge chiar și 500 kHz. În schimb, oamenii pot auzi doar sunete cu frecvențe între câțiva Hz și până la 20 kHz. Mai mult, majoritatea oamenilor nu mai pot auzi nimic după 12 kHz. Așadar, semnalele transmise de liliaci nu pot fi auzite de noi. Cu toate acestea, pentru a diminua necesitatea de a face viabile prea multe noi poziții de liliaci în timpul procedurii numerice, limitele de frecvență recomandate sunt: $\varphi_p^{\min} = 0\%$ și $\varphi_p^{\max} = 100\%$. Parametrul φ_p^k poate fi văzut ca o variație relativă de frecvență în intervalul 0-100% față de lungimea de undă specifică liliacului. Analizând ecuația (3.2), se observă că parametrul de frecvență trebuie adaptat la scara de reprezentare a spațiului de căutare.

Expresia vitezei (3.1) modelează comportamentul esențial al liliacilor: indiferent de viteza și direcția curentă, liliacul își schimbă direcția spre locația prăzii posibile, la fel cum procedează și ceilalți liliaci din mulțime. Această schimbare se observă la diferența dintre vectorul poziției optimale și vectorul poziției curente, de unde rezultă o nouă direcție.

După ce viteza s-a actualizat, liliacul zboară către noua poziție, care poate fi determinată astfel:

$$\mathbf{x}_p^{k+1} = \mathbf{x}_p^k + \mathbf{v}_p^{k+1} \Delta T_p^{k+1}. \quad (3.3)$$

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

În ecuația (3.3), durata zborului ΔT_p^{k+1} este selectată pseudo-aleator din interval $(0, T]$, cu $T > 0$ cunoscut.

Pentru a verifica dacă noua poziție \mathbf{x}_p^{k+1} este viabilă, se aplică următoarele ecuații:

$$\begin{cases} n_p &= \left\lfloor \frac{\mathbf{x}_p^{\max} - \mathbf{x}_p^{k+1}}{\mathbf{x}_p^{\max} - \mathbf{x}_p^{\min}} \right\rfloor, \text{ dacă } \mathbf{x}_p^{k+1} < \mathbf{x}_p^{\min}; \\ \mathbf{x}_p^{k+1} &= \mathbf{x}_p^{k+1} + n_p (\mathbf{x}_p^{\max} - \mathbf{x}_p^{\min}) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} n_p &= \left\lfloor \frac{\mathbf{x}_p^{k+1} - \mathbf{x}_p^{\min}}{\mathbf{x}_p^{\max} - \mathbf{x}_p^{\min}} \right\rfloor, \text{ dacă } \mathbf{x}_p^{k+1} > \mathbf{x}_p^{\max}. \\ \mathbf{x}_p^{k+1} &= \mathbf{x}_p^{k+1} - n_p (\mathbf{x}_p^{\max} - \mathbf{x}_p^{\min}) \end{cases} \quad (3.5)$$

Parametrii \mathbf{x}_p^{\min} și \mathbf{x}_p^{\max} reprezintă limita minimă, respectiv, maximă a spațiului de căutare, pentru fiecare liliac $p \in \overline{1, P}$. Aceste limite sunt alese de utilizator, în funcție de spațiul specific de căutare al problemei de optimizare.

Inițializarea ecuațiilor recursive (3.1) – (3.3) este realizată în manieră aleatoare, printr-un set de locații de plecare pe cât posibil uniform distribuite în spațiul de căutare. Cu poziția \mathbf{x}_p^0 și viteza \mathbf{v}_p^0 inițiale, următoarea viteză \mathbf{v}_p^1 este calculată, mai întâi, prin intermediul ecuațiilor (3.2) și (3.1). După aceea, următoarea poziție, \mathbf{x}_p^1 , este evaluată cu ajutorul ecuației (3.3). Aceasta permite calcularea vitezei \mathbf{v}_p^2 cu care liliacul va zbura, pentru a atinge poziția următoare \mathbf{x}_p^2 și aşa mai departe.

Ecuația de actualizare a poziției, (3.3), poate fi folosită doar dacă liliacul a detectat deja o posibilă pradă. Dacă liliacul încă zboară orbește pentru a găsi hrană, atunci pozițiile se schimbă diferit:

$$\mathbf{x}_p^{k+1} = \mathbf{x}_p^k + \xi_p^k \langle A \rangle_p^k. \quad (3.6)$$

În definiția (3.6), $\xi_p^k \in [-1, 1]$ este un număr selectat pseudo-aleator, exprimând capacitatea de percepție a liliacului față de pachetele de ultrasunete pe care ceilalți lilienci din mulțime le transmit în spațiul de căutare. De asemenea, $\langle A \rangle_p^k$ este media amplitudinilor ultrasunetelor transmise:

$$\langle A \rangle_p^k = \frac{1}{P-1} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^P A_q^k, \quad (3.7)$$

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

unde A_q^k este amplitudinea ultrasunetului generat de liliacul $q \in \overline{1, P}$, diferit de liliacul p . Produsul $\xi_p^k \langle A \rangle_p^k$ este un scalar care se adaugă la fiecare componentă a vectorului curent de poziție, \mathbf{x}_p^k , pentru liliacul p . Efectul este dat de deplasarea cu puțin decalaj al acestei poziții, dar, în general, nu foarte departe. Pentru ca această poziție să fie viabilă, se utilizează formulele (3.4) și (3.5). Totodată, viteza de deplasare rămâne constantă, în acest caz.

Dacă prada este detectată, liliacul trebuie să scadă amplitudinea ultrasunetelor, A_p^k , și, în același timp, să crească rata pachetelor de ultrasunete, r_p^k . Conform biologilor, cele două fenomene sunt modelate prin următoarele ecuații:

$$\begin{cases} A_p^{k+1} &= \alpha \cdot A_p^k \\ r_p^k &= r_p^0 (1 - e^{-\gamma k}) \end{cases}, \quad (3.8)$$

unde $\alpha \in (0, 1)$ este o constantă care exprimă atenuarea relativă a ultrasunetelor, r_p^0 este rata inițială de ultrasunete trimise și $\gamma > 0$ este o altă constantă care cuantifică viteza relativă de creștere a ratei de ultrasunete. În mod normal, constantele α și γ depind de caracteristicile biologice ale mulțimii de lileci. Deoarece este destul de dificilă setarea acestor constante, acestea pot fi alese empiric, după multe rulări ale algoritmului.

Ecuatiile recursive (3.8) au nevoie de inițializări. Pentru amplitudinile A_p^k , se consideră variația într-un interval de la $A^{\min} \in [0, 1]$ la $A^{\max} \in [1, 100]$. Aceste limite nu au niciun efect asupra pozițiilor absolute și vitezelor lilecilor. Așadar, acestea pot fi ușor translatate pe intervalul $[A^{\min} = 0, A^{\max} = 100]$, 100 fiind valoarea implicită pentru A^{\max} . Desigur, $A^{\min} = 0$ descrie o situație ideală în care liliacul a găsit deja prada perfectă într-o poziție din spațiul de căutare, nefiind motivat să zboare altundeva. Amplitudinile inițiale, A_p^0 , trebuie alese în vecinătatea lui A^{\max} , pentru fiecare liliac $p \in \overline{1, P}$. La nivelul ratelor inițiale r_p^0 , se aleg valori mici, aproape nule, pentru a permite un număr suficient de mare de creșteri efective ale ratelor. Dacă r_p^0 este prea mare, se va ajunge rapid la situația în care nu vor mai fi diferențe numerice între rate succesive, deoarece calculatoarele lucrează cu precizie finită.

Procedura standard de optimizare în funcție de comportamentul lilecilor este descrisă în *Algoritm 3.1* [STE-14].

Algoritm 3.1. Procedura standard de optimizare metauristică folosind lileci.

1. Date de intrare:

- Spațiul de căutare $\mathbf{S} \subseteq \mathbb{R}^{nx}$, văzut ca o zonă geografică unde lilecii pot zbura liber. Dacă este posibil, se indică scara de reprezentare de-a lungul axelor spațiului de căutare. Spațiul de căutare poate fi specificat ca un produs cartezian de intervale compacte, unde nx este numărul de necunoscute:

$$\mathbf{S} = [x_{\min,1}, x_{\max,1}] \times [x_{\min,2}, x_{\max,2}] \times \cdots \times [x_{\min,nx}, x_{\max,nx}] = \prod_{i=1}^{nx} [x_{\min,i}, x_{\max,i}]. \quad (3.9)$$

- Definiția criteriului de optimizare f și tipul soluției optime căutate: minim sau maxim.
- Alegerea parametrilor de configurare:
 - populația de lilienci, $P \in \mathbb{N}^*$;
 - banda de frecvență a ultrasunetelor trimise, $[\varphi_p^{\min}, \varphi_p^{\max}]$; implicit, limitele relative sunt: $\varphi_p^{\min} = 0\%$ și $\varphi_p^{\max} = 100\%$;
 - întârzierea maximă a zborurilor liliencilor, $T > 0$;
 - viteza relativă de atenuare a ultrasunetelor, $\alpha \in (0,1)$, implicit $\alpha = 0,9$;
 - viteza relativă a ratei de creștere a ultrasunetelor, $\gamma > 0$, implicit $\gamma = 0,9$;
 - limita superioară a amplitudinilor ultrasunetelor, $A^{\max} > 0$, implicit $A^{\max} = 100$;
 - numărul maxim de iterații, $K_{\max} \in \mathbb{N}^*$;
 - valoarea maximă a factorului de supraviețuire.

2. Inițializare:

- a. Se repartizează cei P lilienci pe pozițiile de decolare $\{\mathbf{x}_p^0\}_{p \in \overline{1,P}} \subset \mathbf{S}$. Dacă nu există o metodă preferată, se utilizează un generator pseudo-aleator de numere uniform distribuite pentru a selecta pozițiile din spațiul de căutare.
- b. Se folosește un generator pseudo-aleator de numere uniform distribuite pentru a seta vitezele inițiale ale liliencilor aflați pe pozițiile de plecare, $\{\mathbf{v}_p^0\}_{p \in \overline{1,P}}$.
- c. Se utilizează un generator pseudo-aleator de numere uniform distribuite pentru a inițializa amplitudinile ultrasunetelor: $\{A_p^0\}_{p \in \overline{1,P}} \subset [0,95 * A^{\max}, A^{\max}]$.
- d. Se folosește un generator pseudo-aleator de numere uniform distribuite pentru a inițializa ratele ultrasunetelor $\{r_p^0\}_{p \in \overline{1,P}} \subset [10^{-7}, 10^{-1}]$.
- e. Se estimează performanțele liliencilor: $\{f(\mathbf{x}_p^0)\}_{p \in \overline{1,P}}$.
- f. Se determină cel mai apropiat liliac de pradă, adică se inițializează soluția optimă: $(\mathbf{x}_C^{opt}, f(\mathbf{x}_C^{opt}))$, unde C este mulțimea de lilienci.

3. Pentru $k \in \overline{0, K_{\max} - 1}$, unde k este indexul iterațiilor:

3.1. Pentru fiecare liliac $p \in \overline{1,P}$:

- 3.1.1. Se utilizează un generator pseudo-aleator de numere uniform distribuite pentru a selecta rata pachetelor de ultrasunete primite: $r^{per} \in [0,1]$.
- 3.1.2. Dacă rata de mai sus este mai mare decât rata ultrasunetelor transmise, mai exact, dacă $r^{per} > r_p^k$, atunci liliacul trebuie să zboare spre poziția optimă. Pentru a realiza această acțiune:
 - 3.1.2.1. Se utilizează un generator pseudo-aleator de numere pentru a selecta factorul de frecvență, $\beta \in [0,1]$.
 - 3.1.2.2. Se estimează frecvența ultrasunetelor transmise, cu ajutorul formulei (3.2).
 - 3.1.2.3. Se evaluatează viteza către soluția optimă pentru întreaga mulțime de lilienci, cu ajutorul ecuației (3.1).

- 3.1.2.4. Se utilizează un generator pseudo-aleator de numere pentru a selecta întârzierea zborului, $\Delta T \in [0, T]$.
- 3.1.2.5. Se estimează următoarea poziție posibilă, cu ajutorul ecuației recursive (3.3).
- 3.1.2.6. Noua poziție obținută, \mathbf{x}_p^{k+1} , se viabilizează folosind formulele (3.4) și (3.5).

- 3.1.3. Altfel, rata ultrasunetelor primite este cel mult egală cu rata ultrasunetelor trimise și liliacul trebuie să zboare orbește către o poziție pseudo-aleatoare. În acest caz:
 - 3.1.3.1. Se utilizează un generator pseudo-aleator de numere pentru a selecta capacitatea de percepție curentă a liliacului, $\xi \in [-1, 1]$.
 - 3.1.3.2. Se calculează amplitudinea medie a ultrasunetelor trimise de către ceilalți lilienci din mulțime, conform definiției (3.7).
 - 3.1.3.3. Se evaluatează următoarea poziție posibilă a liliacului p , cu ajutorul ecuației (3.6).
 - 3.1.3.4. Se păstrează viteza de zbor constantă: $\mathbf{v}_p^{k+1} = \mathbf{v}_p^k$.
 - 3.1.3.5. Noua poziție obținută, \mathbf{x}_p^{k+1} , se viabilizează folosind formulele (3.4) sau (3.5).

- 3.1.4. Se evaluatează performanța liliacului pentru noua poziție calculată: $f(\mathbf{x}_p^{k+1})$.
- 3.1.5. Se utilizează un generator pseudo-aleator de numere pentru a selecta amplitudinea ultrasunetelor pe care liliacul le percep: $A^{per} \in [0, A^{\max}]$.
- 3.1.6. Dacă amplitudinea percepă este mai mică decât amplitudinea ultrasunetelor trimise ($A^{per} < A_p^k$) și dacă liliacul se află într-o poziție mai bună, mai exact, dacă $f(\mathbf{x}_p^{k+1})$ este mai bun decât $f(\mathbf{x}_C^{opt})$, atunci liliacul se apropie de o posibilă pradă. În acest caz, liliacul trebuie să caute mai intens pradă, prin:
 - 3.1.6.1. Scăderea amplitudinii ultrasunetelor trimise, cu ajutorul primei ecuații din sistemul (3.8).
 - 3.1.6.2. Mărirea ratei ultrasunetelor trimise, cu ajutorul ecuației a doua din sistemul (3.8).
- 3.1.7. Altfel, ori liliacul se confruntă cu un obstacol ori este departe de orice pradă. În acest caz, se conservă amplitudinea și rata ultrasunetelor trimise: $A_p^{k+1} = A_p^k$ și $r_p^{k+1} = r_p^k$.
- 3.1.8. Dacă liliacul a ajuns într-o poziție mai bună, adică, dacă $f(\mathbf{x}_p^{k+1})$ este mai bun decât $f(\mathbf{x}_C^{opt})$, atunci se actualizează soluția optimă a mulțimii de lilienci: $\mathbf{x}_C^{opt} \leftarrow \mathbf{x}_p^{k+1}, f(\mathbf{x}_C^{opt}) \leftarrow f(\mathbf{x}_p^{k+1})$ și se resetează factorul de supraviețuire.
- 3.1.9. Dacă liliacul nu a ajuns într-o poziție mai bună, se mărește cu o unitate factorul de supraviețuire.

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

4. Se returnează:

- Valoarea optimă a funcției criteriu f și coordonatele liliacului poziționat cel mai bine: $(\mathbf{x}_C^{opt}, f(\mathbf{x}_C^{opt}))$, dacă s-a ajuns la numărul maxim de iterații, K_{max} , sau dacă factorul de supraviețuire a atins limita impusă de utilizator.

În cadrul acestui algoritm, se pleacă de la un spațiu de căutare larg și se reia căutarea în zone din ce în ce mai înguste, în jurul unor posibile puncte de optim. Utilizatorul poate avea doar un control indirect asupra compromisului dintre explorare și exploatare, în special în cazul parametrilor α și γ . Deoarece programatorul nu are acces direct la parametrii de convergență, algoritmul cu lilieci trebuie rulat de multe ori, cu scopul de a găsi valorile potrivite pentru parametrii de configurare. Acesta este dezavantajul algoritmului. În schimb, acesta returnează rapid soluții precise, dacă parametrii de configurare sunt bine aleși. De asemenea, algoritmul necesită doar expresia matematică a funcției criteriu, nu și gradientul sau matricea Hessiană a ei. Totodată, acesta poate lucra eficient împreună cu alte strategii de optimizare sau metode optime de clasificare.

4. Controlul instalației hidraulice

4.1. Descrierea generală a regulatorului PID

Pentru controlul sistemului, se pleacă de la structura de reglare automată cu un grad de libertate, ilustrată în Figura 4.1, unde $H_R(s)$ este funcția de transfer a regulatorului, iar $H_P(s)$ este cea a procesului.

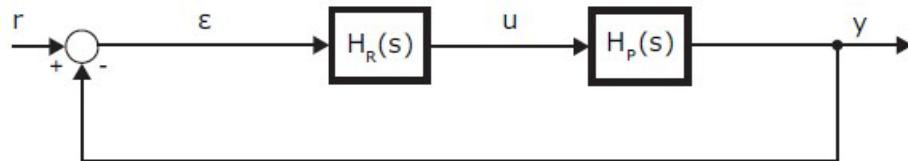


Figura 4.1. Structura de reglare standard [DUM-10]

Structura clasică de regulator PID este prezentată în Figura 4.2.

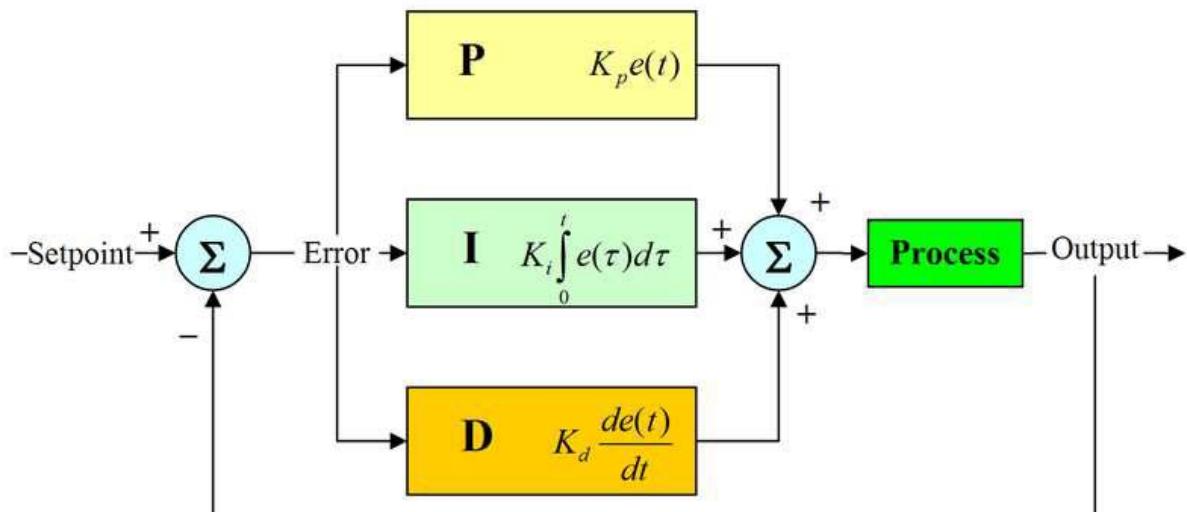


Figura 4.2. Structura clasica a regulatorului PID [LUP-06]

Comanda regulatorului se calculează astfel:

$$u(t) = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right), \quad (4.1)$$

unde $\varepsilon = r - y$ este eroarea de reglare egală cu diferența dintre referință și mărimea reglată.

Reprezentând în domeniul Laplace, funcția de transfer a regulatorului PID devine:

$$H_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (4.2)$$

Din cauza problemelor de realizabilitate fizică a componentei derivative, se folosește un element de filtrare de ordinul întâi, ecuația devenind:

$$H_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N_d} s + 1} \right), \quad (4.3)$$

unde N_d este o constantă de filtrare supra-unitară, stabilită empiric la valoarea 10. Așadar, constanta de timp a filtrului $\frac{T_d}{N_d}$ este suficient de mică pentru a denatura cât mai puțin componenta derivativă a comenzi [ŞtCu-21].

Folositoare separat, componenta proporțională, K_p , conduce la eroare staționară de urmărire a referinței. O dată cu creșterea câștigului, aceasta crește amplificarea semnalului, suprareglajul crește, iar eroarea staționară devine mai mică, dar nu se poate anula. Pentru o valoare prea mare, sistemul intră în instabilitate.

Contribuția componentei integrative, $\frac{1}{T_i s}$, este proporțională atât cu amplitudinea erorii cât și cu durata ei. Integrala înseamnă însumarea tuturor valorilor erorii instantanee de-a lungul timpului. Componenta integrativă va accelera evoluția procesului către valoarea referinței și va înlătura eroarea staționară care poate să apară. Prin urmare, aceasta va răspunde în funcție de valorile acumulate ale erorii în trecut și poate avea, ca efect la momentul actual, apariția suprareglajelor.

Componenta derivativă, $\frac{T_d s}{\frac{T_d}{N_d} s + 1}$, are o acțiune importantă la începutul stabilizării

sistemului și își pierde efectul când se apropiie de regimul staționar. Va conduce la o scădere a suprareglajului provocat de componenta integrativă. Însă, componenta derivativă este sensibilă la perturbații.

Control PID multi-variabil metaeuristică al unei instalații hidraulice.

Regulatoarele de tip PID au un singur grad de libertate [DUM-10]. Prin urmare, ele oferă soluția reglării unui singur obiectiv, acesta fiind urmărirea referinței [LUP-06].

Pentru a obține performanțe cât mai bune, cum ar fi: eroare staționară mică, comenzi netede, răspuns tranzitoriu scurt, suprareglaj scăzut, și rejecție bună a perturbațiilor, se adoptă o altă structură, față de cea clasică a regulatorului PID din Figura 4.2. Se folosește schema din Figura 4.3, deoarece componenta derivativă a comenzi este și mai mult filtrată de către celelalte două componente [ŞtCu-21]. De aici rezultă că noua structură de control PID produce comenzi mai netede decât schema clasică.

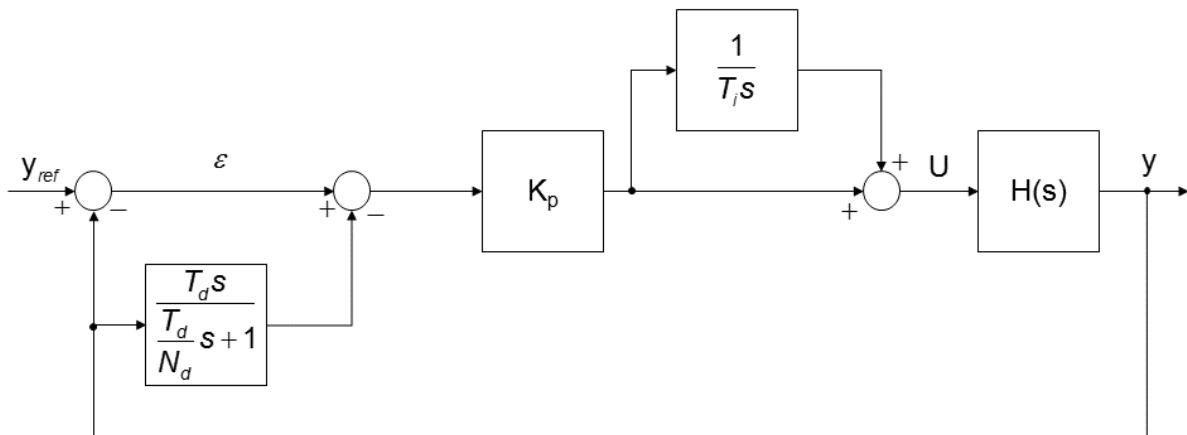


Figura 4.3. Structura de control PID utilizată

Mai departe, schema din Figura 4.3 va fi modificată, astfel încât procesul să fie controlat de un regulator PID multi-variabil.

4.2. Regulatorul PID multi-variabil

În cadrul acestei lucrări, instalația hidraulică este un sistem MIMO cu două intrări și două ieșiri. Pentru a controla acest proces, regulatorul trebuie adaptat astfel încât să urmărească două referințe. Prin urmare, se proiectează un regulator PID multi-variabil, care calculează două comenzi, u_1 și u_2 , în funcție de erorile $\varepsilon_1 = y_{1,\text{ref}} - y_1$ și $\varepsilon_2 = y_{2,\text{ref}} - y_2$, unde $y_{1,\text{ref}}$ și $y_{2,\text{ref}}$ sunt referințele mărimilor măsurate. În acest caz, ele sunt nivelurile de apă din cele două rezervoare. Utilizând acest tip de regulator, cele trei componente se transformă în matrice pătratice de dimensiune 2x2.

$$K_p = \begin{bmatrix} K_p^{11} & K_p^{12} \\ K_p^{21} & K_p^{22} \end{bmatrix}; \quad (4.4)$$

$$T_i(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_i s} & \frac{1}{T_i^{12}s} \\ \frac{1}{T_i^{21}s} & \frac{1}{T_i^{22}s} \end{bmatrix}; \quad (4.5)$$

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

$$T_d(s) = \begin{bmatrix} \frac{T_d^{11}s}{T_d^{11}} & \frac{T_d^{12}s}{T_d^{12}} \\ \frac{N_d}{T_d^{11}s+1} & \frac{N_d}{T_d^{12}s+1} \\ \frac{T_d^{21}s}{T_d^{21}} & \frac{T_d^{22}s}{T_d^{22}} \\ \frac{N_d}{T_d^{21}s+1} & \frac{N_d}{T_d^{22}s+1} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Luând în calcul aceste modificări, schema de reglare adoptată este cea din Figura 4.4.

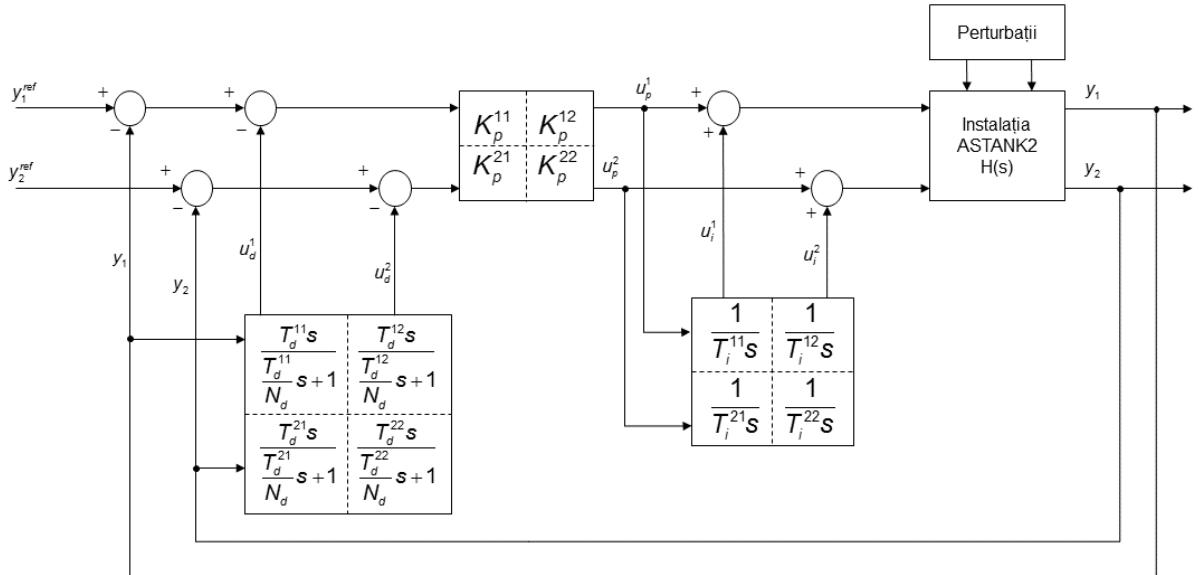


Figura 4.4. Control PID multi-variabil - cazul continuu

Modelul MIMO BJ al procesului este, însă, discret. Prin urmare, regulatorul PID multi-variabil trebuie discretizat. Pentru implementarea discretă a acestuia, se folosește transformarea biliniară a lui Tustin:

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1}, \quad (4.7)$$

unde T_s este perioada de eșantionare.

Componenta proporțională rămâne neschimbată. Componenta integrativă devine:

$$\frac{1}{T_i s} \rightarrow \frac{T_s}{2T_i} \frac{z-1}{z+1}, \quad (4.8)$$

iar componenta derivativă se transformă în:

$$\frac{T_d s}{T_d s + 1} \rightarrow \frac{2T_d N_d (z-1)}{(N_d T_s + 2T_d) z + (N_d T_s - 2T_d)}. \quad (4.9)$$

În urma acestor modificări, structura de reglare care poate fi folosită în simulare este cea din Figura 4.5.

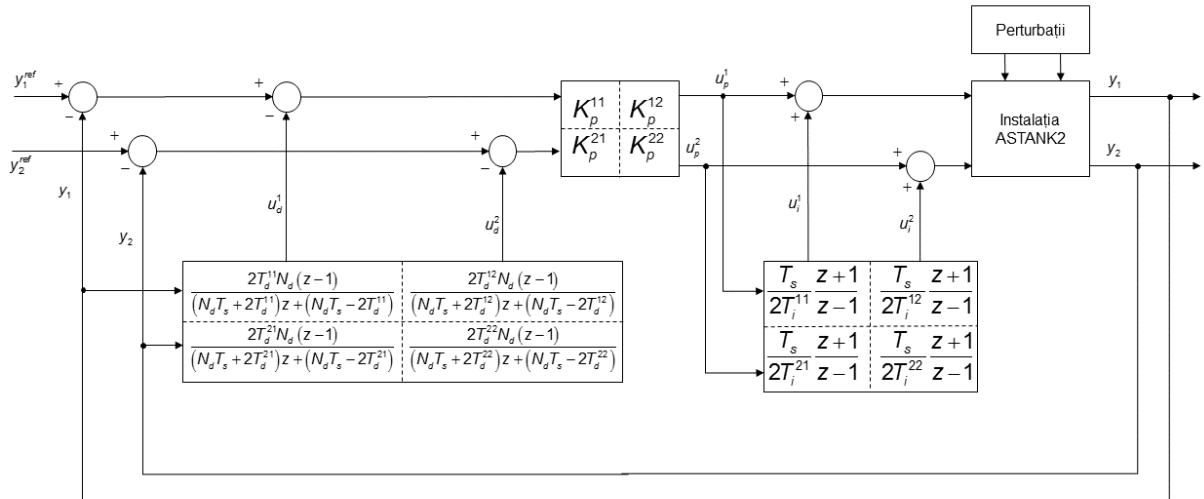


Figura 4.5. Control PID multi-variabil - cazul discret

4.3. Implementarea structurii de control în MATLAB-SIMULINK™

Pentru simularea controlului instalației tehnologice, s-a ales MATLAB-SIMULINK™, ca mediu de programare. Pentru a implementa structura de reglare din Figura 4.5, se utilizează mai multe blocuri din biblioteca Simulink®.

Pentru construirea buclelor de reacție, se utilizează funcții de transfer discrete, în care se specifică, sub formă de vector, coeficienții polinoamelor celor două modele ARX: $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, B_{11}, B_{12}, B_{21}, B_{22}$, precum și pentru filtrele de zgromot ARMA: C_1, C_2, D_1, D_2 . Deoarece funcțiile de transfer sunt discrete, acestea au nevoie și de valoarea perioadei de eșantionare, T_s . Totodată, filtrele de zgromot $\frac{C_1}{D_1}$ și $\frac{C_2}{D_2}$ primesc, ca intrări, valori de la generatoare de zgromot alb sau *Band-Limited White Noise*, în care se specifică puterea zgromotului, λ^2 , timpul de eșantionare, T_s și o variabilă inițială, *seed*, care depinde de ceasul calculatorului. Schema completă a procesului este ilustrată în Figura 4.6. Funcția MATLAB™ *Nan2Zero* are rolul de a rezolva problema în care valorile returnate de proces nu pot fi citite. Dacă acestea sunt *NaN*, atunci sunt convertite la valoarea 0. Altfel, se păstrează valoarea returnată de proces.

Matricea componentei proporționale se reprezintă cu un bloc *Gain*, în care multiplicitatea este de formă K^*u , unde K este matricea parametrilor proporționali, K_p , iar u este vectorul alcătuit din cele două intrări, grupate cu un multiplexor. Matricele integrative și derivative se implementează în Simulink® folosind blocuri din biblioteca LTI, care acceptă variabile de tip *funcție de transfer*. Parametrii *discreteIntegralSystem* și *discreteDerivativeSystem* sunt variabile de tip *transfer function MIMO*, matrici 2x2 formate din funcții de transfer discretizate de forma (4.8) și (4.9):

Control PID multi-variabil metaeuristică al unei instalații hidraulice.

$$discreteIntegralSystem: T_{i(z)} = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{2T_i^{11}} \frac{z+1}{z-1} & \frac{T_s}{2T_i^{12}} \frac{z+1}{z-1} \\ \frac{T_s}{2T_i^{21}} \frac{z+1}{z-1} & \frac{T_s}{2T_i^{22}} \frac{z+1}{z-1} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

discreteDerivativeSystem:

$$T_{d(z)} = \begin{bmatrix} \frac{2T_d^{11}N_d(z-1)}{(N_dT_s + 2T_d^{11})z + (N_dT_s - 2T_d^{11})} & \frac{2T_d^{12}N_d(z-1)}{(N_dT_s + 2T_d^{12})z + (N_dT_s - 2T_d^{12})} \\ \frac{2T_d^{21}N_d(z-1)}{(N_dT_s + 2T_d^{21})z + (N_dT_s - 2T_d^{21})} & \frac{2T_d^{22}N_d(z-1)}{(N_dT_s + 2T_d^{22})z + (N_dT_s - 2T_d^{22})} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

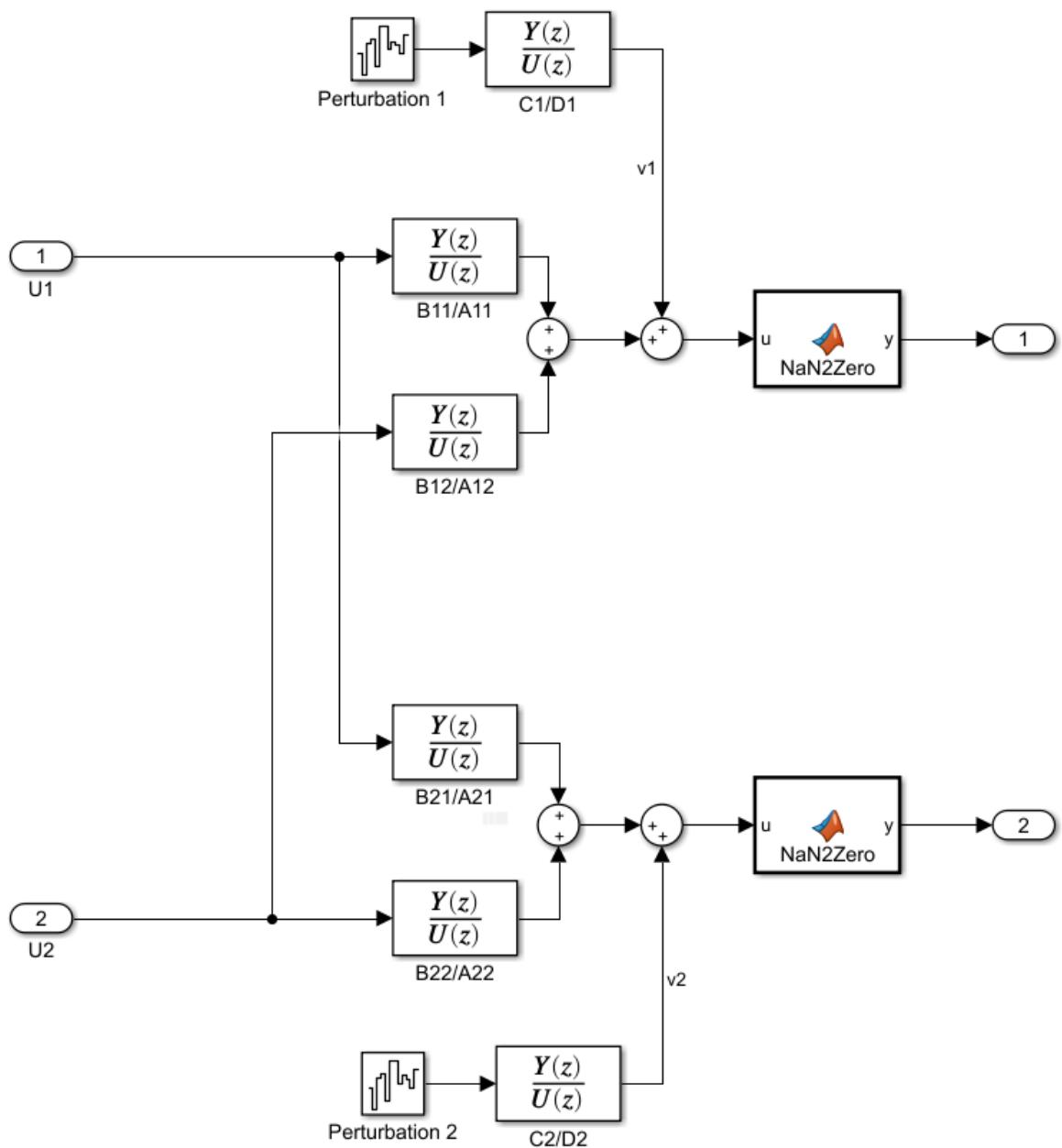


Figura 4.6. Subsistemul SIMULINK® al modelului de identificare MIMO BJ

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

Pentru a controla corect procesul, se ține cont de limitările instalației tehnologice, menționate la finalul secțiunii 2.2. Prin urmare, pentru a proteja electrovalvele, comenziile trebuie saturează, înainte să fie transferate mai departe în sistem. Așadar, se introduce în schema Simulink® diagrama din Figura 4.7, pentru fiecare comandă, obținându-se sub-sistemele din Figura 4.8.

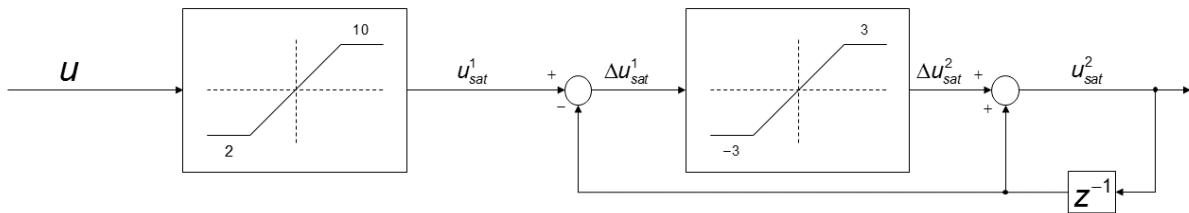


Figura 4.7. Diagrama comenzi saturate

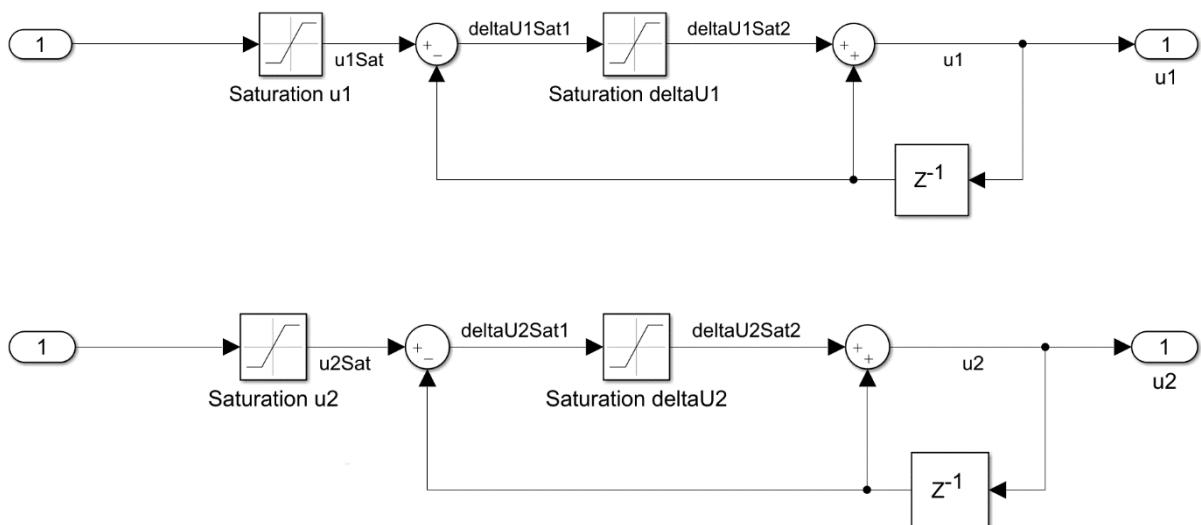


Figura 4.8. Subsistemele SIMULINK® ale comenzielor modelului MIMO BJ

Comanda finală se formează din comanda anterioară, prin intermediul blocului de întârziere, la care se adaugă diferența saturată la ± 3 V dintre comanda curentă trimisă de regulator și aceeași comandă anterioară. Astfel, dacă diferența se încadrează în intervalul $[-3, +3]$ V, atunci comanda finală coincide cu aceea furnizată de regulator, comanda anterioară fiind anihilată. Prin urmare, comanda regulatorului este modificată, astfel încât să fie protejate electrovalvele.

De asemenea, se introduc și blocuri de saturare pe canalele de ieșire pentru a le limita între 0 și 15 cm. În absența lor, nu se poate simula reglarea în mod realist, deoarece rezervoarele nu pot avea nici nivel negativ și nici peste 15 cm, din cauza volumului limitat de lichid care se recirculă. Pentru a simula structura de reglare, se consideră, ca întrări, referințe de tip treaptă, implementate utilizând blocuri Step, cu perioada de eşantionare T_s . Luând în calcul toate elementele descrise mai sus, diagrama globală Simulink® pentru simularea controlului instalației hidraulice este ilustrată în Figura 4.9.

Control PID multi-variabil metaheuristic al unei instalații hidraulice.

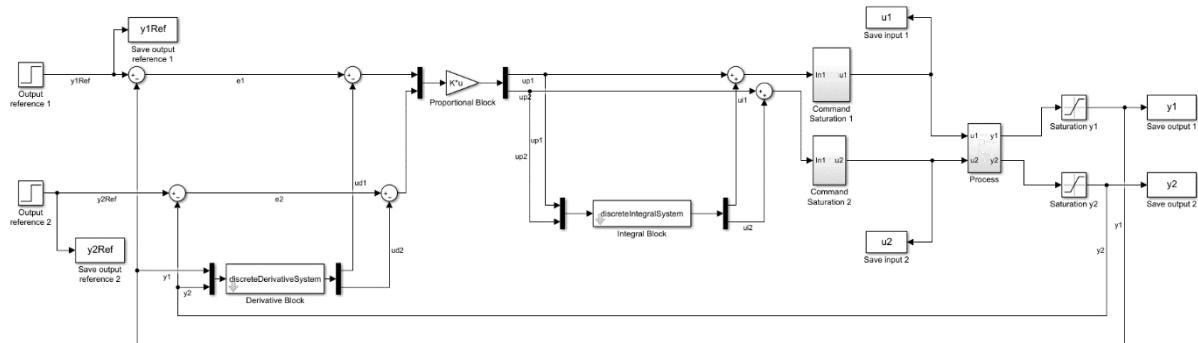


Figura 4.9. Modelul Simulink® de control al instalației ASTANK2 cu PID multi-variabil

5. Analiza rezultatelor de simulare

5.1. Utilizarea Algoritmului Lilieciilor în determinarea PID optimal

Pentru a simula corect structura de reglare automată din Figura 4.9, Algoritmul Lilieciilor este adaptat să caute cei doisprezece parametri optimi ai regulatorului PID, maximizând o funcție criteriu, care depinde de semnalele intrare-iesire (I/O) returnate de modelul Simulink® asociat.

Algoritmul 3.1 se adaptează astfel:

1. Se găsește un vector de dimensiune egală cu 12, alcătuit din numere negative, reprezentând, simultan, coordonatele lilieciilor în spațiul de căutare și parametrii regulatorului:

$$\mathbf{x} = [K_p^{11} \ K_p^{12} \ K_p^{21} \ K_p^{22} \ T_i^{11} \ T_i^{12} \ T_i^{21} \ T_i^{22} \ T_d^{11} \ T_d^{12} \ T_d^{21} \ T_d^{22}]^T \quad (5.1)$$

2. Se utilizează metoda de discretizare a lui Tustin pentru a calcula parametrii regulatorului în varianta discretă.
3. Se realizează simularea modelului din Figura 4.9, de unde rezultă datele I/O necesare evaluării funcției cost.
4. Se evaluatează funcția criteriu.
5. Se operează cu valoarea maximală returnată de funcția cost, care oferă vectorul optimal de parametri ai regulatorului.

Se observă că, în acest caz, algoritmul primește, ca date de intrare, vectorul cu cei doisprezece parametri inițiali ai regulatorului PID multi-variabil, iar funcția cost se calculează prin simularea controlului procesului.

Ca date de ieșire, algoritmul returnează soluția optimală, alcătuită din:

- valoarea maximală a funcției criteriu;
- vectorul \mathbf{x} optimal;
- factorul de supraviețuire;
- la ce iterație s-a găsit soluția;
- cât timp a durat până s-a găsit soluția;
- durata de funcționare a algoritmului.

Algoritmul 3.1 are nevoie atât de parametrii de configurare, cât și de constantele necesare simulării structurii de reglare.

Constantele esențiale pentru simularea modelului de control sunt:

- coeficienții polinoamelor funcțiilor de transfer ale procesului: $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, B_{11}, B_{12}, B_{21}, B_{22}$;
- coeficienții polinoamelor funcțiilor de filtrare a zgomotului alb Gaussian care perturbă cele două canale ale procesului;
- dispersiile zgomotului alb pentru cele două canale: λ_1^2, λ_2^2 ;
- perioada de eșantionare, T_s ;
- durata simulării;
- limitele de saturatie pentru cele două intrări ale procesului, precum și limita de variație a tensiunii;
- limitele de saturatie pentru cele două ieșiri ale procesului;
- referințele mărimilor măsurate ale procesului, $y_{1,ref}, y_{2,ref}$;
- optional, referințele comenzilor, $u_{1,ref}, u_{2,ref}$;
- generatorul de numere pseudo-aleatoare pentru formarea zgomotului alb, pe fiecare canal.

5.2. Definirea criteriului de optimizare și determinarea regulatorului optimal

Problema optimizării este formulată în contextul unei funcții cost sau criteriu, definită ca mai jos:

$$f : \mathbf{S} \rightarrow \mathbb{R}, \quad (5.2)$$

unde spațiul de căutare \mathbf{S} este un subspațiu al mulțimii \mathbb{R}^{nx} , iar nx reprezintă numărul de necunoscute. Funcția f poate prezenta multe extreme locale. De asemenea, pot fi dificil de evaluat derivatele funcției în forma completă. Totuși, se poate evalua criteriul f pentru fiecare punct x din spațiul de căutare \mathbf{S} , rezolvând următoarea problemă de optimizare:

$$\underset{x \in \mathbf{S}}{\text{opt } f}. \quad (5.3)$$

Expresia (5.3) implică găsirea valorii optime globale a lui f și punctul optim $x^{opt} \in \mathbf{S}$. Pentru a rezolva această problemă, se compară diverse valori ale criteriului și puncte din spațiul de căutare. Deoarece căutarea trebuie să se sfârșească după o durată rezonabilă, doar un subspațiu discret din \mathbf{S} , cum ar fi \mathbf{D} , poate fi folosit în acest scop. Pentru a nu rata valoarea optimă globală, subspațiul \mathbf{D} trebuie să includă un număr mare de puncte pentru testare.

Problema (5.3) devine:

$$\underset{x \in \mathbf{D} \subset \mathbf{S}}{\text{opt } f}, \quad (5.4)$$

unde \mathbf{D} este subspațiul discret finit menționat mai sus. Din cauza numărului mare de puncte din \mathbf{D} ce trebuie testate, acestea se numesc *granule*. Așadar, expresia (5.4) devine o *problemă de optimizare granulară* [ȘTE-14]. Soluția acestei probleme reprezintă, în acest context, găsirea granulei din \mathbf{D} , localizată cât mai aproape de punctul optim global al lui f .

Control PID multi-variabil metaeuristică al unei instalații hidraulice.

Pentru a determina parametrii optimali ai regulatorului PID multi-variabil, se poate minimiza o funcție cost bazată pe eroarea pătratică de urmărire a referințelor impuse:

$$f(K_p^{11}, K_p^{12}, \dots, T_d^{21}, T_d^{22}) = \sum_{n=1}^N (y_1[n] - y_{1,\text{ref}}[n])^2 + \sum_{n=1}^N (y_2[n] - y_{2,\text{ref}}[n])^2, \quad (5.5)$$

unde $N \in \mathbb{N}^*$ este numărul de eșantioane înregistrate la măsurarea celor două ieșiri. Însă, această funcție are un dezavantaj. În cazul în care una din cele două sume este mică, iar cealaltă este mare, de aici ar rezulta că una dintre cele două ieșiri nu ar mai urmări referința impusă, chiar dacă valoarea funcției cost este minimală.

Prin urmare, se poate considera o altă funcție, care calculează abaterea maximă a celor două canale de ieșire:

$$f(K_p^{11}, K_p^{12}, \dots, T_d^{21}, T_d^{22}) = \max \left\{ \max_{n \in 1, N} |y_1[n] - y_{1,\text{ref}}[n]|, \max_{n \in 1, N} |y_2[n] - y_{2,\text{ref}}[n]| \right\}. \quad (5.6)$$

În expresia (5.6) trebuie separată partea tranzitorie (cu abatere maximă mare) de cea de regim staționar (unde abaterea maximă este sensibil mai mică), obținându-se următoarele definiții:

$$f_{y,2} = \left\| [y_1[k] - y_{1,\text{ref}}[k]; y_2[m] - y_{2,\text{ref}}[m]] \right\|_2, \forall k \in \overline{1, t_{t1}}, \forall m \in \overline{1, t_{t2}}, \quad (5.7)$$

$$f_{y,\infty} = \max \left\{ \max_{n \in t_{t1}+1, N} |y_1[n] - y_{1,\text{ref}}[n]|, \max_{p \in t_{t2}+1, N} |y_2[p] - y_{2,\text{ref}}[p]| \right\}. \quad (5.8)$$

Deoarece semnalele de ieșire sunt perturbate de zgomote stocastice, nu se pot folosi formule analitice pentru calcularea timpilor tranzitorii: $t_{t1}, t_{t2} \in [1, N] \cap \mathbb{Z}$. Pentru măsurarea acestora, se utilizează o metodă statistică, bazată pe deviația standard inversă [ŞtCu-2021] a erorii semnalului de ieșire, $\varepsilon = y - y_{\text{ref}}$:

$$\sigma_{\varepsilon}^{\text{inv}}[k] = \sqrt{\frac{1}{k+1} \sum_{n=N-k}^N |\varepsilon[n] - \mu_{\varepsilon}^{\text{inv}}[k]|^2}, \forall k \in \overline{1, N-1}, \quad (5.9)$$

unde $\mu_{\varepsilon}^{\text{inv}}$ este media valorilor erorii:

$$\mu_{\varepsilon}^{\text{inv}}[k] = \frac{1}{k+1} \sum_{n=N-k}^N \varepsilon[n], \forall k \in \overline{1, N-1}. \quad (5.10)$$

Așadar, deviația standard se calculează invers, de la finalul semnalului la începutul acestuia. Valorile obținute sunt memorate în vectorul, $\sigma_{\varepsilon}^{\text{inv}}$. Această variabilă este penalizată ulterior folosind criteriul Akaike-Rissanen [ŞtCu-2021], cu scopul de a izola cu precizie mai mare punctul de minim:

$$\sigma_{\varepsilon}^{\text{inv}, A-R}[k] = \log(\sigma_{\varepsilon}^{\text{inv}}[k]) + \frac{k}{2N} \log(N), \forall k \in \overline{1, N-1}. \quad (5.11)$$

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

Dacă se detectează o zonă tranzitorie validă, punctul minim al lui $\sigma_{\varepsilon}^{inv,A-R}$ constituie o estimare a timpului tranzitoriu, t_t .

Expresiile matematice (5.7) și (5.8) operează cu numere ce pot atinge diferite valori maxime necunoscute. Pentru a aduce funcția cost la o gamă finită de variație, aceasta se modifică astfel încât să returneze valori procentuale:

$$F_y = \frac{50}{N} \cdot \left(\frac{t_{t1} + t_{t2}}{1 + \sigma_2 f_{y,2}} + \frac{2N - t_{t1} - t_{t2}}{1 + \sigma_{\infty} f_{y,\infty}} \right) [\%], \quad (5.12)$$

unde σ_2 și σ_{∞} sunt factori care permit scalarea valorii criteriului de optimizare. Dacă aceștia se scriu sub forma:

$$\sigma_2 = \frac{1}{t_{t1} + t_{t2}}, \quad (5.13)$$

$$\sigma_{\infty} = \frac{1}{2N - t_{t1} - t_{t2}}, \quad (5.14)$$

atunci, funcția cost va returna valori cuprinse în intervalul [60, 100] % pentru majoritatea granulelor. De această dată, funcția cost trebuie maximizată.

Funcția cost (5.12) a fost folosită în Algoritmul Liliecilor, pentru a determina regulatorul optim. Parametrii de configurare ai algoritmului sunt selectați conform Tabelului 5.1.

Tabelul 5.2.1. Parametrii de configurare ai Algoritmului Liliecilor

P	φ^{\min}	φ^{\max}	T	α	γ	A^{\max}	K^{\max}
60	0%	100%	10^{-5}	0,95	0,9	90	1000

De asemenea, limita superioară a factorului de supraviețuire este egal cu populația de lilieci, P .

Simulările au fost realizate în MATLAB-SIMULINK™, implementând diagrama din Figura 4.9. Se aleg, pentru referințele ieșirilor, valorile: $y_{1,ref} = 8$ cm, $y_{2,ref} = 9$ cm. Totodată, perioada de eșantionare este $T_s = 1$ s, pentru toate simulările. Deoarece instalația hidraulică are o dinamică lentă, durata simulărilor este setată la 1000 s. De asemenea, simulările se execută pe un calculator alcătuit dintr-un procesor Intel® Core™ i5-7300HQ, cu frecvență de procesare egală cu 2,5 GHz, și 8 GB de memorie RAM.

Spațiul de căutare pentru cei doisprezece parametrii ai regulatorului se împarte în trei părți și este specificat ca un produs cartezian de intervale compacte, ca în expresia (3.9):

- pentru componenta proporțională:

$$\mathbf{S}_{K_p} = [0,1] \times [0,1] \times [0,1] \times [0,1]; \quad (5.15)$$

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

2. pentru componenta integrativă:

$$\mathbf{S}_{T_i} = [1,100] \times [1,100] \times [1,100] \times [1,100]; \quad (5.16)$$

3. pentru componenta derivativă:

$$\mathbf{S}_{T_d} = [0,1] \times [0,1] \times [0,1] \times [0,1]. \quad (5.17)$$

S-a ales acest spațiu de căutare, deoarece, elementele proporționale și derivative trebuie să rămână mici, subunitare, pentru a nu degrada stabilitatea sistemului, iar cea integrativă trebuie să fie mare pentru a asigura urmărirea referinței [DUM-10].

După aplicarea Algoritmului Lilieciilor, se găsește valoarea funcției cost:

$$F_y = 96,82\%, \quad (5.18)$$

iar parametrii optimali ai regulatorului returnați sunt:

$$K_p = \begin{bmatrix} 0,1569 & 0,4067 \\ 0,1569 & 0,9073 \end{bmatrix}, T_i = \begin{bmatrix} 71,7049 & 71,707 \\ 46,8885 & 22,1677 \end{bmatrix} [s], T_d = \begin{bmatrix} 0,9073 & 0,4066 \\ 0,1569 & 0,157 \end{bmatrix} [s]. \quad (5.19)$$

Se observă că elementele din cele trei matrici de mai sus respectă spațiul de căutare impus. Această soluție a fost găsită la iterată $k = 41$ din cele $K_{max} = 1000$ și a durat aproximativ 20 de minute pentru a ajunge la rezultatul final. Algoritmul s-a oprit după 68 de minute, după ce factorul de supraviețuire a atins limita setată la 60.

În Figura 5.1, se observă cum ieșirile se stabilizează și urmăresc cu succes referințele, dar prezintă un suprareglaj mare.

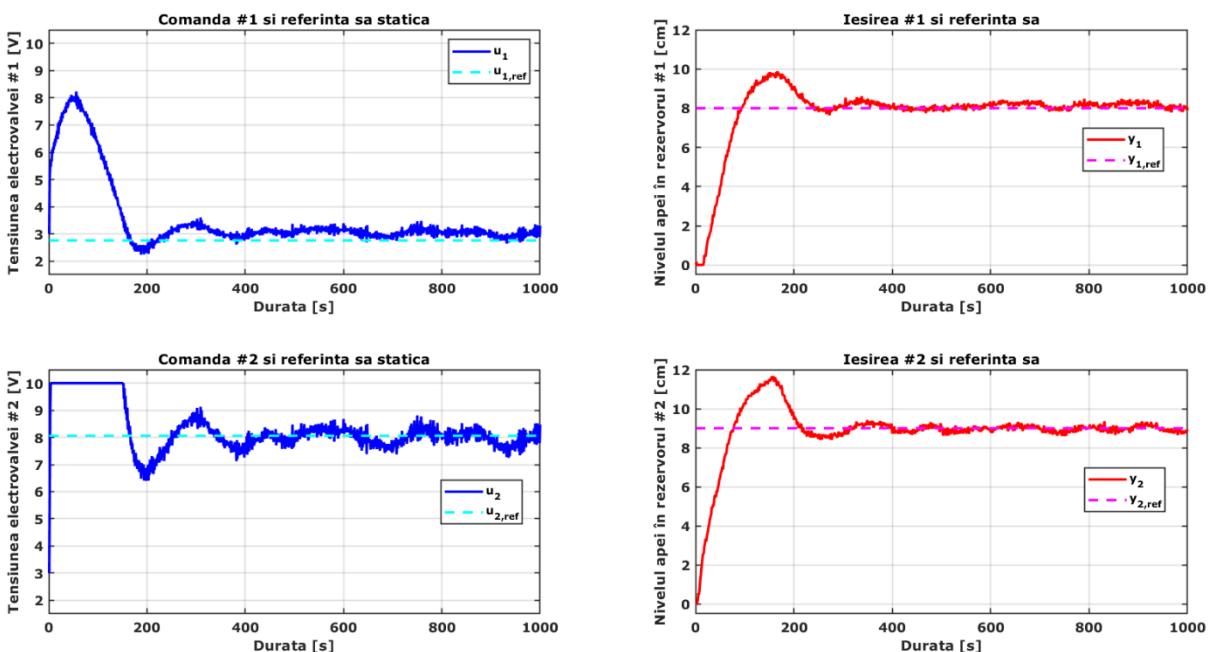


Figura 5.1. Semnalele de intrare și ieșire ale procesului, pentru $F_y = 96,82\%$

A doua comandă, u_2 , prezintă saturatie de tensiune la 10 V, la începutul reglării. Se dorește ca aceste saturări să dureze puțin și să apară rar sau, în cel mai bun caz, să

Control PID multi-variabil metaeuristică al unei instalații hidraulice.

nu existe. În această situație, a doua comandă rămâne saturată destul de mult, mai exact 152 de secunde, afectând fiabilitatea electrovalvei. Totodată, prima comandă prezintă un suprareglaj mare față de referință. Dacă nivelul de apă din primul rezervor s-ar mări, atunci și această comandă ar fi saturată la 10 V.

Funcția cost F_y , definită în (5.12), oferă performanțe bune doar pe ieșire. Dacă spațiul de căutare sau parametrii de configurare din Tabelul 5.1 ar fi diferiți, există riscul ca noul regulator obținut să genereze comenzi supra-solicitante și să defecteze electrovalvele în timp. Absența unei componente referitoare la intrări în funcția cost poate produce oscilații importante ale comenzilor. Prin urmare, se definește și un criteriu de optimizare pentru comenzi, F_u :

$$F_u = \frac{50}{N} \cdot \left(\frac{t_{t_1} - t_{t_2}}{1 + \sigma_2 f_{u,2}} + \frac{2N - t_{t_1} - t_{t_2}}{1 + \sigma_\infty f_{u,\infty}} \right), \quad (5.20)$$

unde:

$$f_{u,2} = \left\| [u_1[k]; u_2[m]] \right\|_2, \quad \forall k \in \overline{1, t_{t_1}}, \quad \forall m \in \overline{1, t_{t_2}}, \quad (5.21)$$

$$f_{u,\infty} = \left\| [u_1[n] - \mu_{u_1}; u_2[p] - \mu_{u_2}] \right\|_2, \quad \forall n \in \overline{t_{t_1} + 1, N}, \quad \forall p \in \overline{t_{t_2} + 1, N}, \quad (5.22)$$

$$\mu_{u_1} = \frac{1}{N - t_{t_1} - 1} \sum_{i=t_{t_1}+1}^N u_1[i], \quad \mu_{u_2} = \frac{1}{N - t_{t_2} - 1} \sum_{j=t_{t_2}+1}^N u_2[j]. \quad (5.23)$$

Așadar, pe zona tranzitorie, se micșorează normele Euclidiene ale comenzilor, iar pe zona staționară, se micșorează dispersia în jurul mediei fiecărei comenzi, stabilizându-se, ca în cazul ieșirilor. În final, noul criteriu de optimizare, F , se formează din media aritmetică a celor două funcții din (5.12) și (5.20):

$$F = \frac{F_u + F_y}{2}. \quad (5.24)$$

Calculând valoarea lui F pentru parametrii optimali (5.2.19), se obține următorul rezultat:

$$F = 95,83%. \quad (5.25)$$

Se aplică din nou Algoritmul Lilieciilor, cu aceeași parametri de configurare ca în Tabelul 5.1, același spațiu de căutare și aceleași referințe pentru intrări și ieșiri, dar utilizând noul criteriu de optimizare, (5.24). După finalizarea calculelor, se obține următoarea valoare a funcției cost:

$$F = 96,6%, \quad (5.26)$$

iar parametrii optimali ai regulatorului returnați sunt:

$$K_p = \begin{bmatrix} 0,1398 & 0,0723 \\ 0,0498 & 0,8148 \end{bmatrix}, \quad T_i = \begin{bmatrix} 93,7411 & 93,7413 \\ 68,9916 & 44,2407 \end{bmatrix} [s], \quad T_d = \begin{bmatrix} 0,8148 & 0,0723 \\ 0,0498 & 0,1398 \end{bmatrix} [s]. \quad (5.27)$$

Control PID multi-variabil metaeuristică al unei instalații hidraulice.

Această soluție a fost găsită la iterația $k = 6$ din cele $K_{max} = 1000$ și a durat aproximativ 3 minute pentru a ajunge la rezultatul final. Algoritmul s-a oprit după 22 de minute, când factorul de supraviețuire a atins limita setată la 60. Algoritmul a durat mai puțin pentru că au existat puncte optime locale în inițializare. Dacă nu erau incluse, algoritmul ar fi durat mai mult.

În Figura 5.2, se observă cum graficul ieșirii y_2 se stabilizează și urmărește cu succes referința. De asemenea, în comparație cu cea din Figura 5.1, suprareglajul acesteia a scăzut. Totodată, graficul comenzi u_2 nu mai prezintă saturare la nivelul superior, electrovalva fiind protejată. Însă, se poate vedea cum eroarea de urmărire a primei referințe $y_{1,ref}$ a crescut.

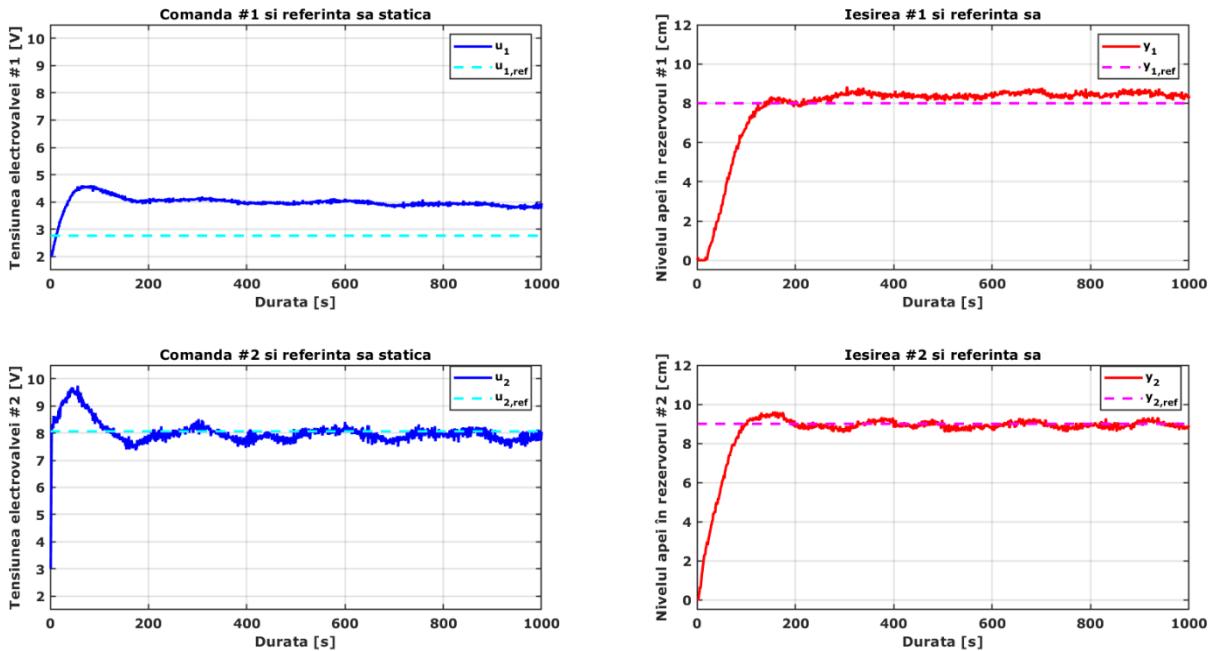


Figura 5.2. Semnalele de intrare și ieșire ale procesului, pentru $F = 96,6\%$

Pentru a îmbunătăți comportamentul regulatorului PID, este util ca el să fie proiectat în jurul unui punct static (nominal) de funcționare al instalației ASTANK2, dacă este disponibil. S-au efectuat măsurători pentru determinarea unor astfel de puncte statice și s-a construit o tabelă aferentă [CuŞtDu-15]. Acestea se obțin fixând electrovalvele la diferite deschideri, prin tensiunile de comandă și așteptând să se stabilizeze nivelurile de lichid din cele două rezervoare. Găsirea acestor puncte statice este posibilă datorită proprietății procesului de a se comporta local liniar. Tabela include, așadar, câte o pereche de intrări constante (tensiuni aplicate electrovalvelor), căreia îi corespunde o pereche de ieșiri constante (niveluri de lichid din cele două rezervoare, după stabilizare). În Tabelul 5.2 sunt enumerate câteva puncte statice de funcționare. Alte puncte statice se pot obține prin interpolare liniară între cele din tabel.

Tabelul 5.2. Puncte statice de funcționare ale instalației ASTANK2

$U_{1,ref}$ [V]	2,7595 V	3,2423 V	2,7004 V	2,7005 V
$U_{2,ref}$ [V]	8,0633 V	8,491 V	9,0044 V	9,4815 V
$y_{1,ref}$ [cm]	8 cm	8,5 cm	8,5 cm	9 cm
$y_{2,ref}$ [cm]	9 cm	9,5 cm	10 cm	10 cm

Control PID multi-variabil metaeuristică al unei instalații hidraulice.

Pentru a îmbunătăți funcția criteriu, se elimină media alunecătoare (5.23) din definiția (5.22) și se ține cont de punctul static al comenzi, $f_{u,\infty}$ devenind:

$$f_{u,\infty} = \left\| [u_1[n] - u_{1,\text{ref}}[n]; u_2[p] - u_{2,\text{ref}}[p]] \right\|_2, \\ \forall n \in \overline{t_{t_1} + 1, N}, \forall p \in \overline{t_{t_2} + 1, N}. \quad (5.2.28)$$

Prin urmare, se caută un nou regulator PID multi-variabil, în care criteriul de optimizare se folosește de noua formulă (5.28). Se utilizează din nou Algoritmul Lilieciilor cu aceeași parametri de configurare ca în Tabelul 5.1, și se obține următoarea valoare a funcției cost:

$$F = 96,6621\%. \quad (5.29)$$

Parametrii optimi ai noului regulator PID multi-variabil sunt:

$$K_p = \begin{bmatrix} 0,2398 & 0,0648 \\ 0,0398 & 0,9898 \end{bmatrix}, T_i = \begin{bmatrix} 93,7412 & 243,7389 \\ 143,9899 & 44,2403 \end{bmatrix} [s], T_d = \begin{bmatrix} 0,989 & 0,064 \\ 0,039 & 0,239 \end{bmatrix} [s]. \quad (5.30)$$

Pentru a obține acest regulator, s-a modificat spațiul de căutare pentru cele trei componente ale regulatorului:

$$\mathbf{S}_{K_p} = [0,1] \times [0,01,0,1] \times [0,01,0,1] \times [0,1,1]; \quad (5.31)$$

$$\mathbf{S}_{T_i} = [1,100] \times [1,400] \times [1,400] \times [1,100]; \quad (5.32)$$

$$\mathbf{S}_{T_d} = [0,1] \times [0,01,0,1] \times [0,01,0,1] \times [0,1,1]. \quad (5.33)$$

Această soluție a fost găsită la iterată $k = 7$ din cele $K_{max} = 1000$ și a durat aproximativ 2 minute și 30 de secunde pentru a ajunge la rezultatul optim. Algoritmul s-a oprit după 21 de minute, când factorul de supraviețuire a atins limita setată la 60. Aici, ca și mai înainte, algoritmul a durat puțin pentru că au fost incluse niște optime locale în inițializare. Dacă nu erau incluse, algoritmul ar fi durat mai mult.

În Figura 5.3, se observă cum graficele ieșirilor se stabilizează și urmăresc referințele, $y_{1,\text{ref}} = 8 \text{ cm}$ și $y_{2,\text{ref}} = 9 \text{ cm}$. De asemenea, cele două comenzi ajung să urmărească bine cele două puncte statice ale intrărilor procesului, $u_{1,\text{ref}} = 2,7595 \text{ V}$ și $u_{2,\text{ref}} = 8,0633 \text{ V}$, erorile staționare fiind mai mici față de cele ilustrate în Figura 5.2. În cadrul graficului comenzi u_2 , se remarcă saturarea accidentală la nivelul superior al tensiunii, în primele 60 de secunde ale simulării. Ideal ar fi ca saturările la nivelul tensiunii să nu existe, dar atât timp cât acestea sunt rare și de scurtă durată, electrovalvele sunt protejate. Graficele ilustrate de Figura 5.3 demonstrează că definiția criteriului de optimizare care ține cont de punctele statice de funcționare este cea mai bună dintre cele trei descrise până acum, oferind, totodată, cea mai bună acordare a regulatorului PID multi-variabil.

Control PID multi-variabil metaheuristic al unei instalații hidraulice.

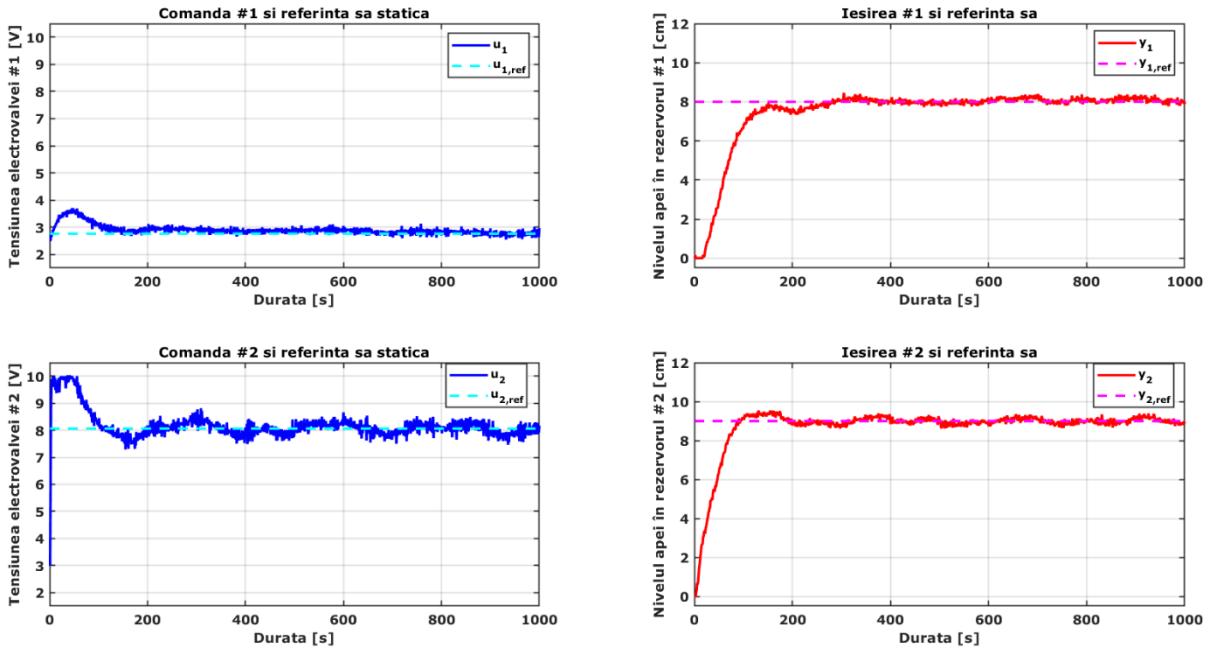


Figura 5.3. Semnalele de intrare și ieșire ale procesului, pentru $F = 96,6621\%$

Figura 5.4 prezintă șase suprafețe de stare ale criteriului de optimizare, menținând constanți zece parametri ai regulatorului PID optimal determinat și variind alți doi în jurul valorilor lor optimale. Se variază următoarele elemente: K_p^{11} , K_p^{22} , T_i^{11} , T_i^{22} , T_d^{11} , T_d^{22} .

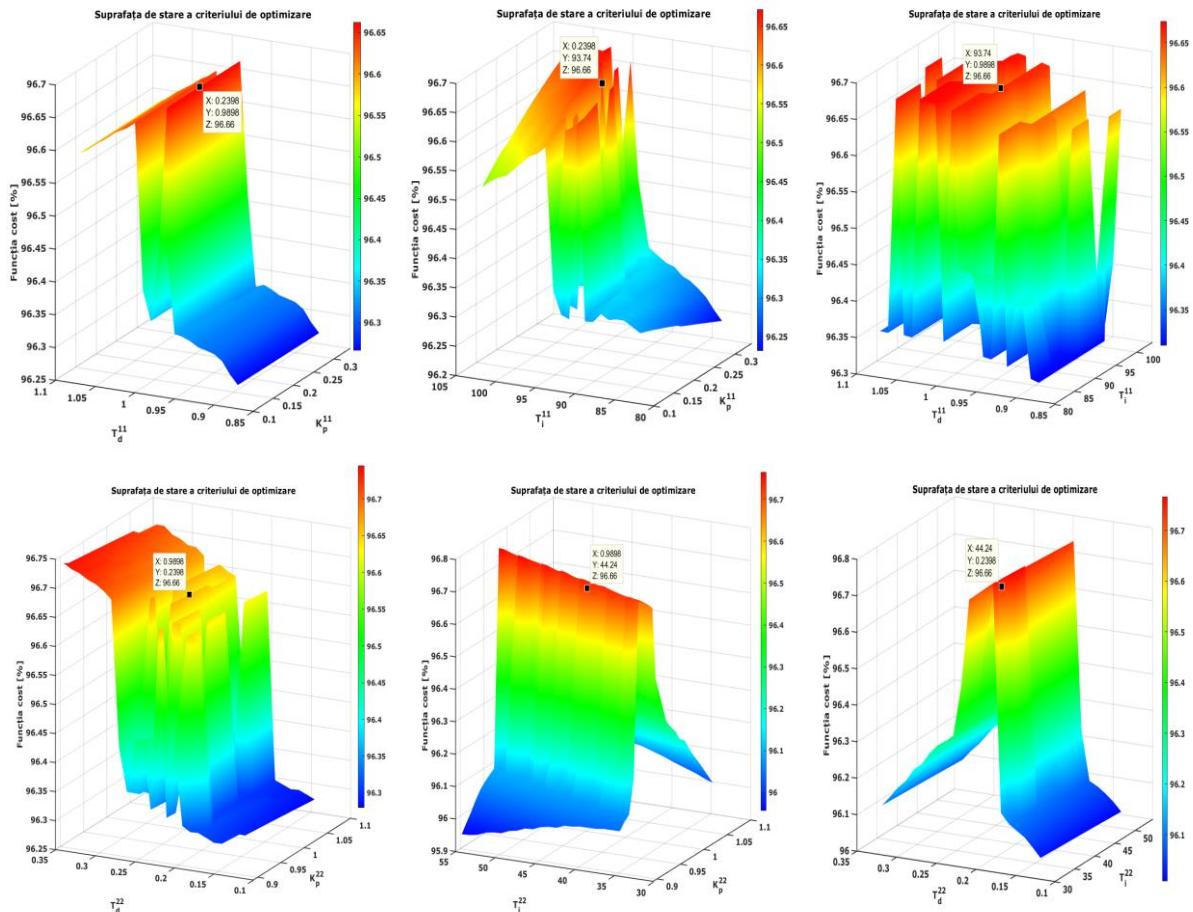


Figura 5.4. Suprafețe criteriale fractale în determinarea regulatorului PID optimal

Pe fiecare suprafață s-a marcat optimul găsit. Se observă natura fractală a acestor suprafete, fapt care justifică alegerea unei metaeuristici pentru rezolvarea problemei de optimizare.

5.3. Testarea regulatorului PID optimal

Niciun regulator nu este perfect, toate având anumite limitări. În această secțiune, se testează sistemul în buclă închisă, în cadrul mai multor scenarii. Mai întâi, se determină empiric vecinătatea de liniaritate din jurul punctului static pentru care regulatorul funcționează corect. După aceea, se analizează capacitatea de reacție a perturbațiilor accidentale și persistente pe ieșiri, precum și cea de urmărire a unor referințe în scară.

Această analiză este importantă, deoarece, cunoșcând atât capabilitățile, cât și limitările regulatorului, se previn sau se repară mai rapid posibilele defecte care pot să apară în timpul funcționării sistemului. Totodată, se îmbunătățește fiabilitatea instalației și se reduc costurile de menenanță ale acesteia.

5.3.1. Vecinătatea de bună funcționare a regulatorului

În secțiunea precedentă s-a obținut regulatorul PID multi-variabil optimal, utilizând următoarele referințe pentru ieșiri: $y_{1,ref} = 8 \text{ cm}$ și $y_{2,ref} = 9 \text{ cm}$. În continuare, valorile acestora se modifică, în jurul lor, cu pasul 0,1 cm. Mai departe, se realizează simulări pentru toate combinațiile posibile și se memorează valorile returnate de funcția cost într-o matrice, fiind ulterior afișată ca în Figura 5.5.

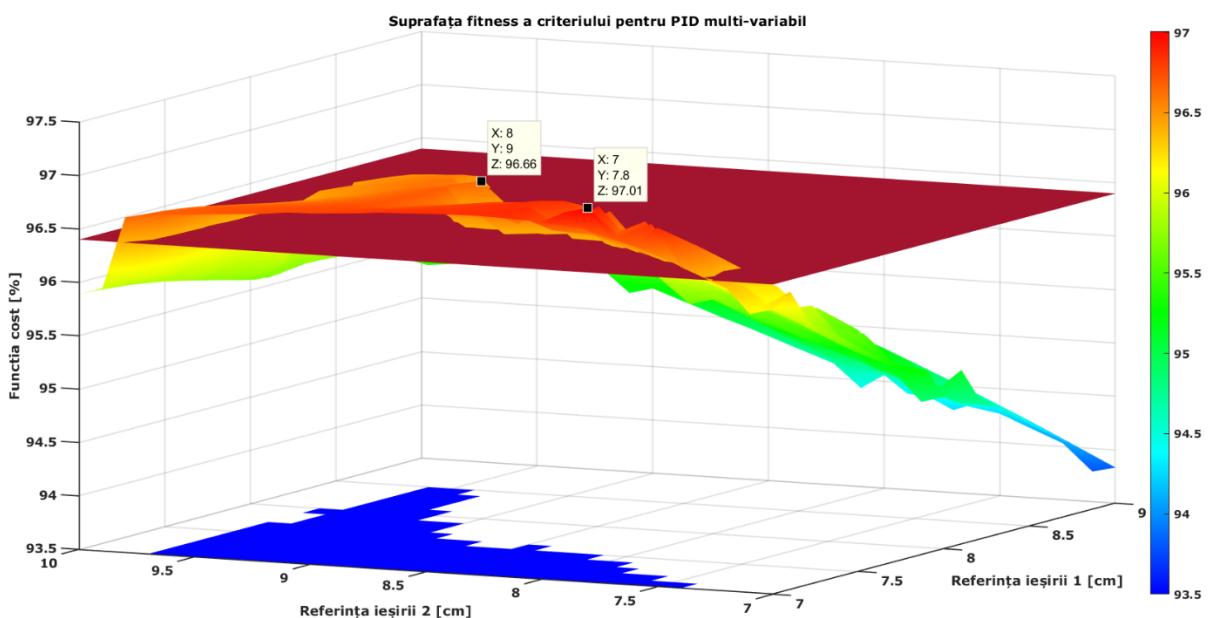


Figura 5.5. Suprafața criterială și vecinătatea de bună funcționare a regulatorului PID optimal în jurul punctului static selectat

Figura 5.5 ilustrează totodată și care este vecinătatea din jurul punctului static selectat în care regulatorul funcționează corect. Această suprafață s-a calculat folosind referințele $u_{1,ref}$ și $u_{2,ref}$, ce corespund referințelor $y_{1,ref}$ și $y_{2,ref}$, cu ajutorul interpolării liniare între punctele statice ale tabelei. Această suprafață relevă din nou aspectul

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

fractal al funcției cost. Mai departe, în Figurile 5.6 – 5.9 se afișează graficele intrărilor și ieșirilor pentru referințele situate în cele patru colțuri ale suprafeței criteriale.

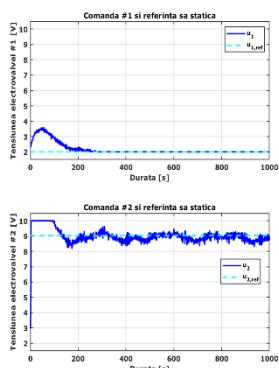


Figura 5.6. Graficele I/O pentru $y_{1,\text{ref}} = 7 \text{ cm}$, $y_{2,\text{ref}} = 10 \text{ cm}$ și $F = 95,89\%$

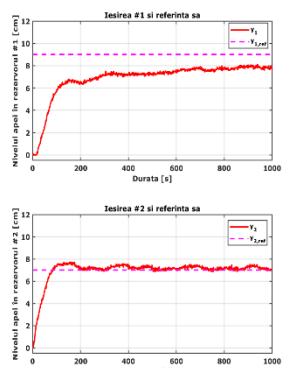
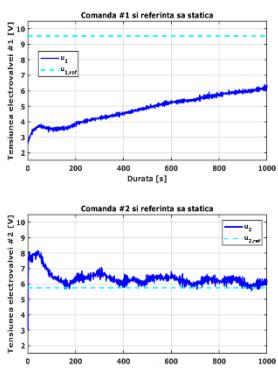
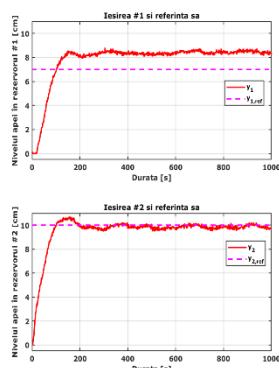


Figura 5.7. Graficele I/O pentru $y_{1,\text{ref}} = 9 \text{ cm}$, $y_{2,\text{ref}} = 7 \text{ cm}$ și $F = 93,83\%$

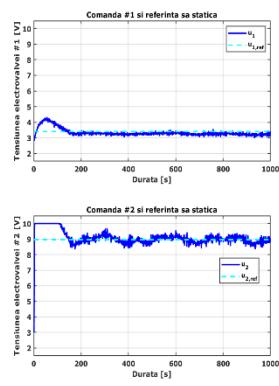


Figura 5.8. Graficele I/O pentru $y_{1,\text{ref}} = 9 \text{ cm}$, $y_{2,\text{ref}} = 10 \text{ cm}$ și $F = 95,56\%$

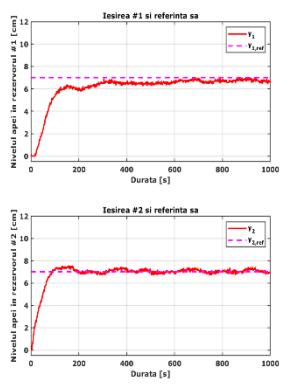
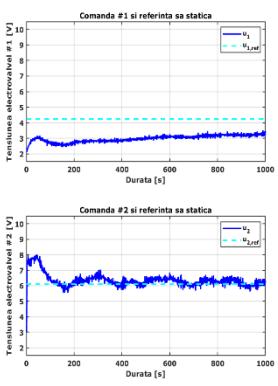
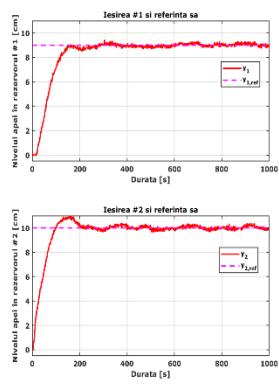


Figura 5.9. Graficele I/E pentru $y_{1,\text{ref}} = 7 \text{ cm}$, $y_{2,\text{ref}} = 7 \text{ cm}$ și $F = 96,17\%$

După cum se poate observa, combinațiile de referințe cu valori mai mici ale funcției cost produc erori de urmărire, în special pe canalul 1, care pare mai sensibil. Figurile 5.6 și 5.7 ilustrează că regulatorul furnizează comenzi oscilante și are probleme în a urmări referințele, mai ales când diferența dintre referințe este mare. Ca să micșorăm aceste efecte, trebuie să deplasăm în sus planul orizontal ilustrat în Figura 5.5. El intersectează suprafața criterială după o curbă neregulată. Teoretic, planul trebuie să fie stabilit la o înălțime aleasă în aşa fel încât referințele ieșirilor corespunzătoare curbei de intersecție cu suprafața criterială să fie toate (sau în majoritatea cazurilor) bine urmărite.

În Figurile 5.10 – 5.11, se afișează grafice și pentru referințe aflate mai aproape de punctul optim. De această dată, ambele referințe sunt bine urmărite.

Există și un maxim al suprafeței criteriale, situat la valoarea de 97,01%, superior valorii optimale găsite de către Algoritmul Lilieciilor. Totuși, acest maxim se înregistrează pentru referințele $y_{1,\text{ref}} = 7 \text{ cm}$, $y_{2,\text{ref}} = 7,8 \text{ cm}$, regulatorul optimal fiind proiectat pentru altă pereche de referințe. Comportamentul I/O al simulatorului pentru punctul de maxim al suprafeței criteriale este ilustrat în Figura 5.12.

Control PID multi-variabil metaheuristic al unei instalații hidraulice.

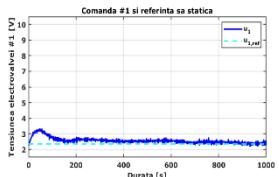


Figura 5.10. Graficele I/O pentru $y_{1,ref} = 7,2 cm, $y_{2,ref} = 8,2 cm și $F = 96,87\%$$$

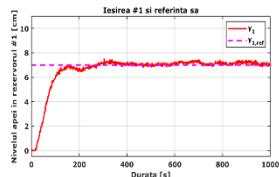
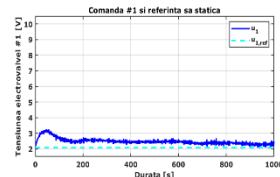
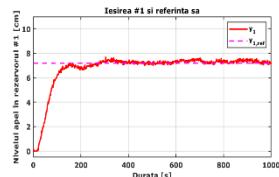


Figura 5.11. Graficele I/O pentru $y_{1,ref} = 7 cm, $y_{2,ref} = 8 cm și $F = 96,85\%$$$

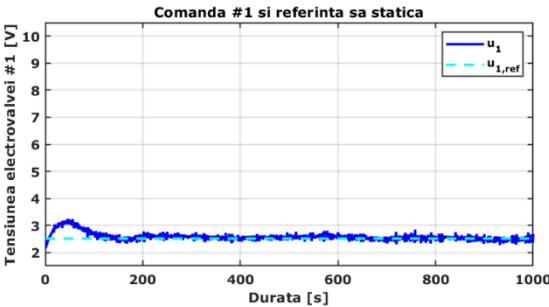
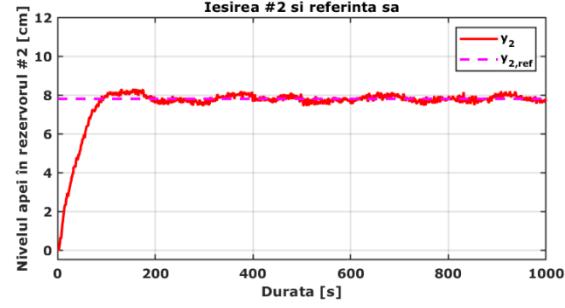
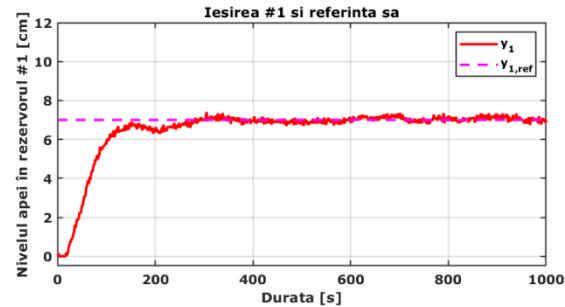


Figura 5.12. Graficele I/O pentru punctul maxim cu $y_{1,ref} = 7 cm, $y_{2,ref} = 7,8 cm și $F = 97,01\%$$$



În Figura 5.12, se observă că referințele sunt urmărite cu precizie, atât la intrări cât și la ieșiri, iar comenziile nu prezintă saturatii la nivelul superior de tensiune, electrovalvele fiind protejate.

După câteva teste, s-a stabilit în mod empiric (dar realist) că înălțimea planului orizontal poate fi stabilită la valoarea 96,4% (ca în Figura 5.5). De asemenea, figurile anterioare sugerează că oscilațiile comenziilor se atenuează pe măsură ce valorile referințelor ieșirilor se apropiu de punctul optim. După cum se poate observa, regulatorul este mai puțin sensibil la schimbarea referinței ieșirii secunde, dar mai sensibil la schimbarea referinței primei ieșiri, indiferent că este a doua referință. Acest efect este cauzat de peretele înclinat al primului rezervor al instalației, care introduce neliniaritate în model.

Planul orizontal de culoare roșu închis are rolul de a permite estimarea empirică a vecinătății în jurul punctului static ale pentru care regulatorului poate fi utilizat. Aceasta izolează, în planul de jos, vecinătatea recomandată de utilizare. Planul a fost poziționat la 96,4% pe baza următoarelor perechi de puncte marginale de la intersecția planului cu suprafața criterială:

Control PID multi-variabil metaeuristic al unei instalații hidraulice.

$$\begin{aligned} & \left\{ y_{1,\text{ref}} = 8,1 \text{ cm}, y_{2,\text{ref}} = 9,1 \text{ cm} \right\}, \\ & \left\{ y_{1,\text{ref}} = 8,4 \text{ cm}, y_{2,\text{ref}} = 9,5 \text{ cm} \right\}, \\ & \left\{ y_{1,\text{ref}} = 7,1 \text{ cm}, y_{2,\text{ref}} = 8,5 \text{ cm} \right\}. \end{aligned} \quad (5.34)$$

Graficele I/O ale acestora sunt ilustrate în Figurile 5.13 – 5.15.

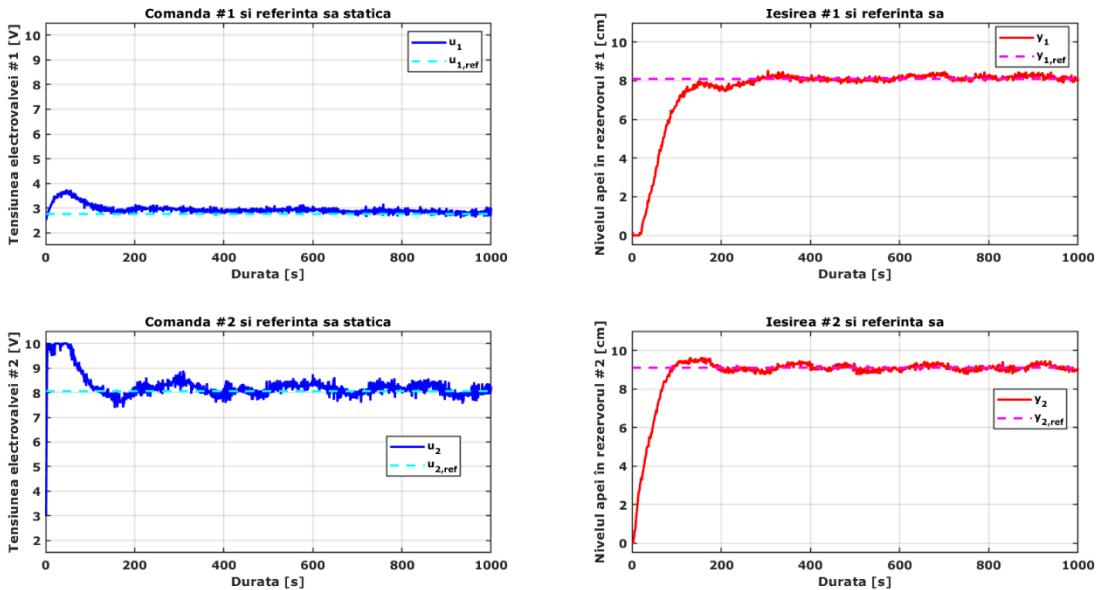


Figura 5.13. Graficele I/O pentru $y_{1,\text{ref}} = 8,1 \text{ cm}$, $y_{2,\text{ref}} = 9,1 \text{ cm}$ și $F = 96,4\%$

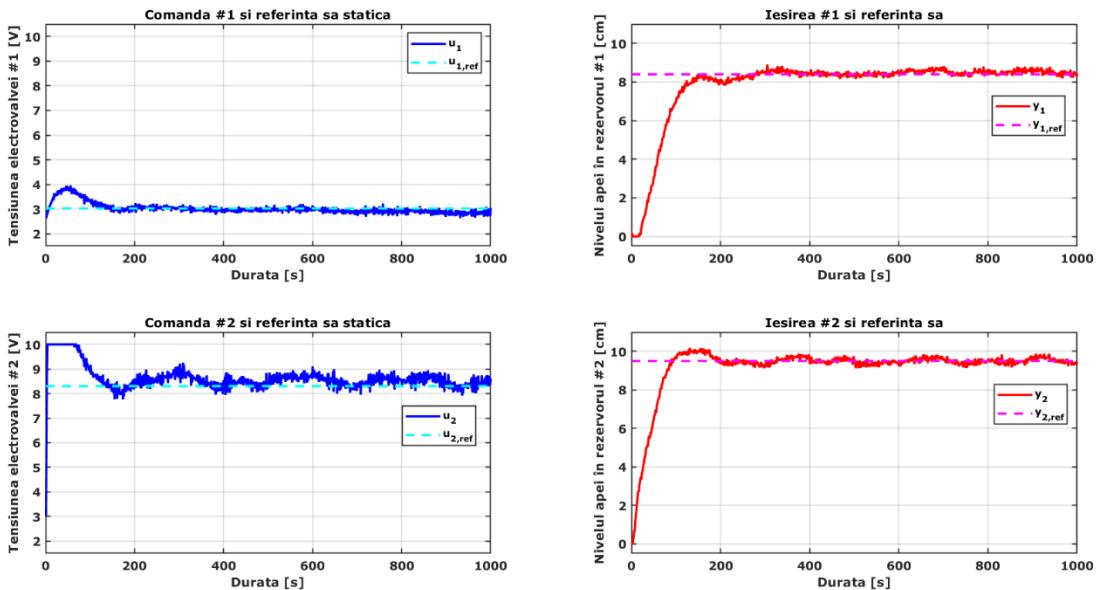


Figura 5.14. Graficele I/O pentru $y_{1,\text{ref}} = 8,4 \text{ cm}$, $y_{2,\text{ref}} = 9,5 \text{ cm}$ și $F = 96,42\%$

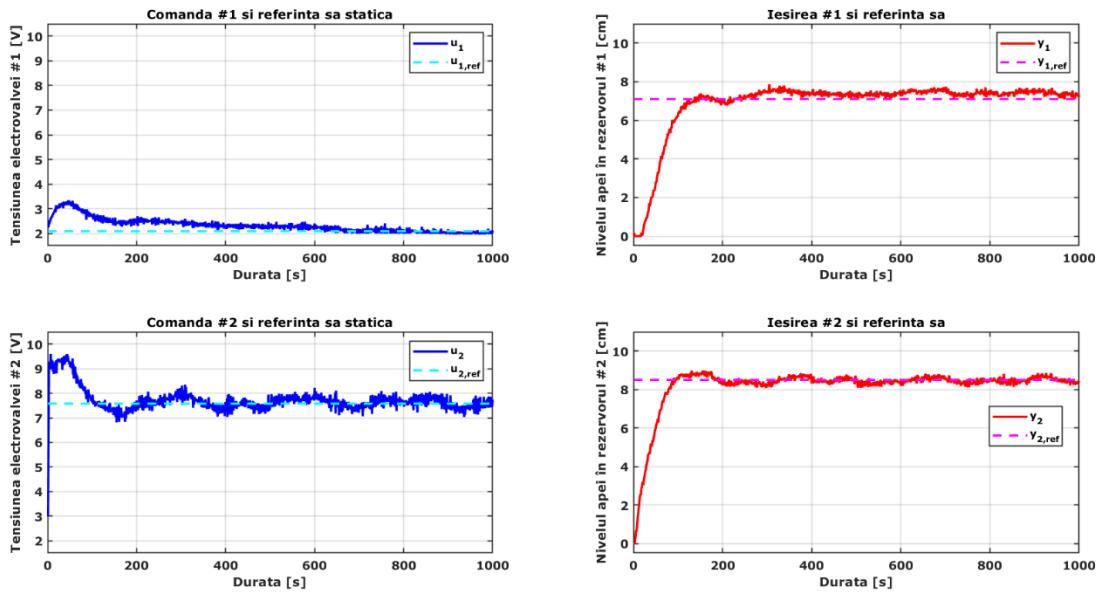


Figura 5.15. Graficele I/O pentru $y_{1,\text{ref}} = 7,1$ cm, $y_{2,\text{ref}} = 8,5$ cm și $F = 96,42\%$

Figura 5.15 ilustrează că prima ieșire este la limita urmării referinței. Se observă că, dacă durata simulării ar fi fost mai mare, ieșirea de pe primul canal s-ar fi stabilizat. Acest grafic justifică faptul că există o estimare empirică de precizie satisfăcătoare a vecinătății de liniaritate. Totodată, suprafața albastră din Figura 5.5 reprezintă proiecția pe planul xOy a suprafeței criteriale situate deasupra planului de separație (deci, cu valori ale funcției criteriu de cel puțin 96,4%).

5.3.2. Capacitatea de reacție a perturbațiilor accidentale pe ieșiri

În această sub-secțiune, se testează capacitatea regulatorului PID multi-variabil optimal de a reacționa la perturbații accidentale pe ieșiri. Mai întâi, se introduce câte o perturbație accidentală pe cele două canale de ieșire, sub formă de impuls, de câte 5 și 7 cm, în sus, la momente diferite. Primul este generat după 400 de secunde pe prima ieșire, iar al doilea apare după 600 de secunde pe a doua ieșire. Apoi, se repetă și pentru impulsuri orientate în jos. Urmează unul în sus, altul jos și invers. Se repetă totul și pentru impulsuri acționate în același timp, după 500 de secunde de la începerea simulării.

Rezultatele de simulare sunt afișate în Figurile 5.16 – 5.19. Figurile următoare ilustrează că regulatorul PID optimal, găsit prin intermediul Algoritmului Liliencilor, prezintă un avantaj: reacția bună a perturbațiilor accidentale, de tip impuls. Cu toate acestea, se observă și un dezavantaj: creșterea oscilațiilor comenziilor, mai ales în cazul comenzi u_2 . Cu cât impulsurile sunt mai înalte, cu atât cresc oscilațiile în comenzi, existând riscul de deteriorare a electrovalvelor în timp.

Control PID multi-variabil metaheuristic al unei instalații hidraulice.

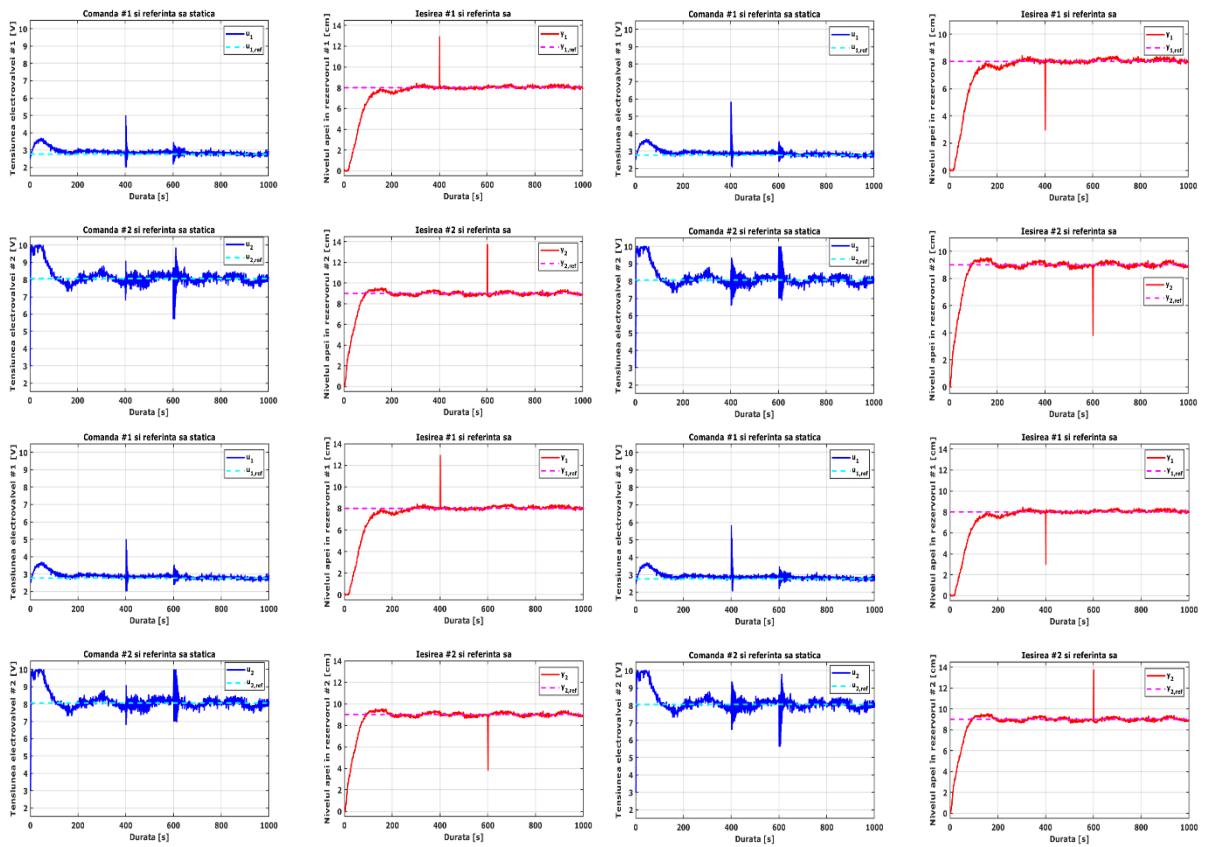


Figura 5.16. Rejecția impulsurilor de 5 cm, la momente diferite, 400, respectiv 600 de secunde

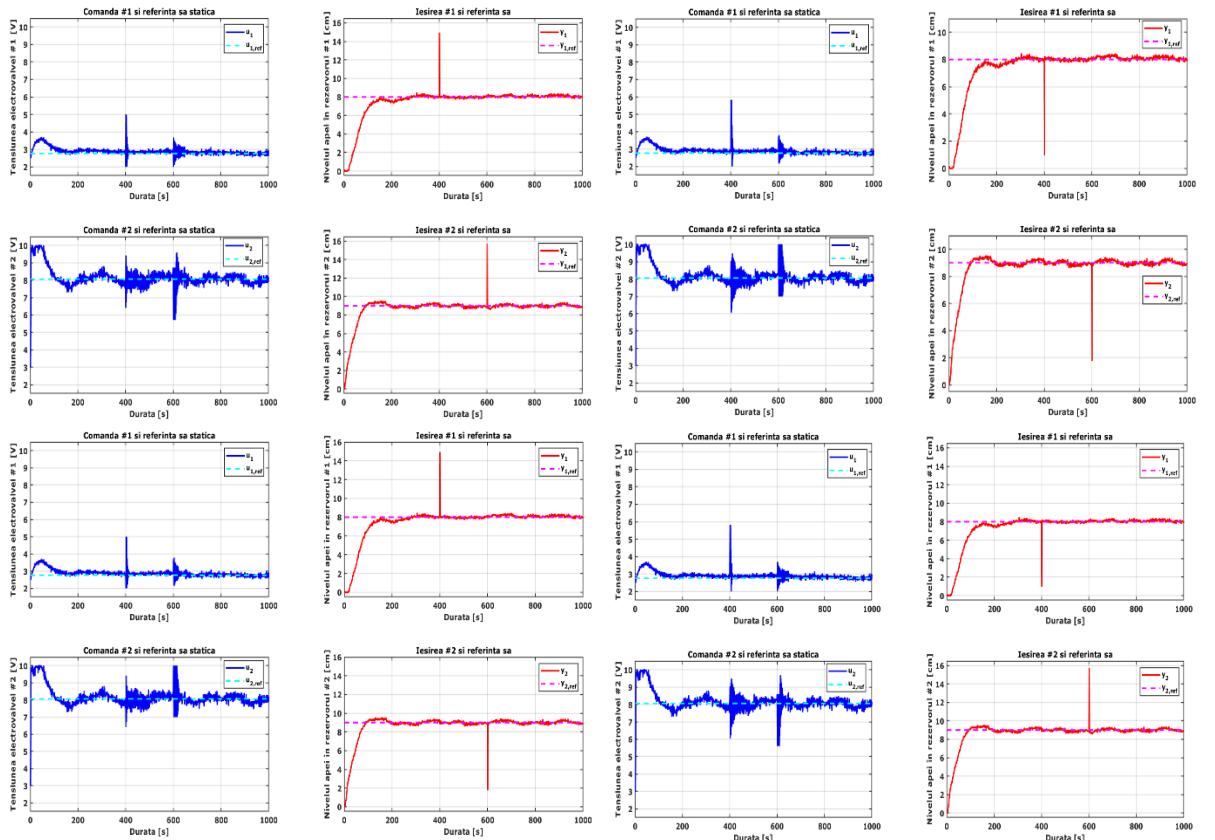


Figura 5.17. Rejecția impulsurilor de 7 cm, la momente diferite, 400, respectiv 600 de secunde

Control PID multi-variabil metaheuristic al unei instalații hidraulice.

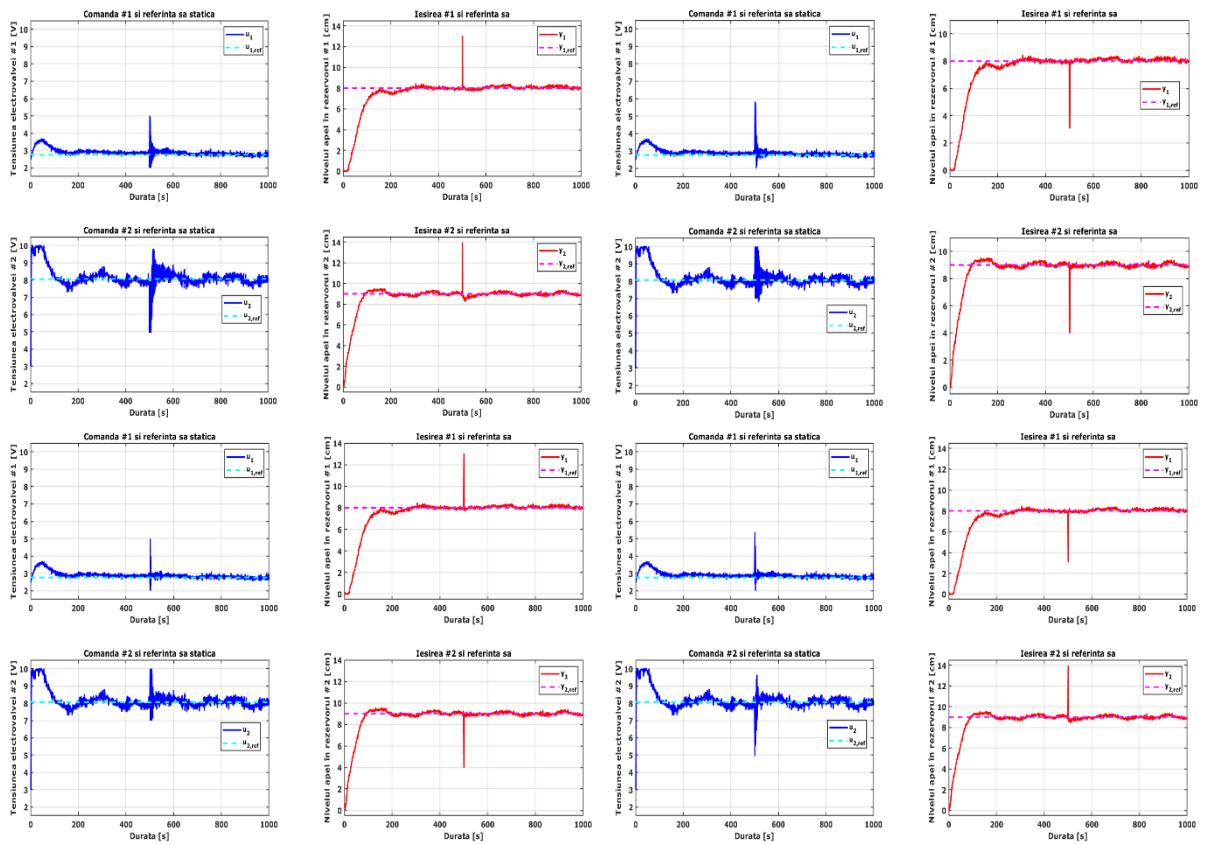


Figura 5.18. Rejecția impulsurilor de 5 cm, simultan, la 500 de secunde

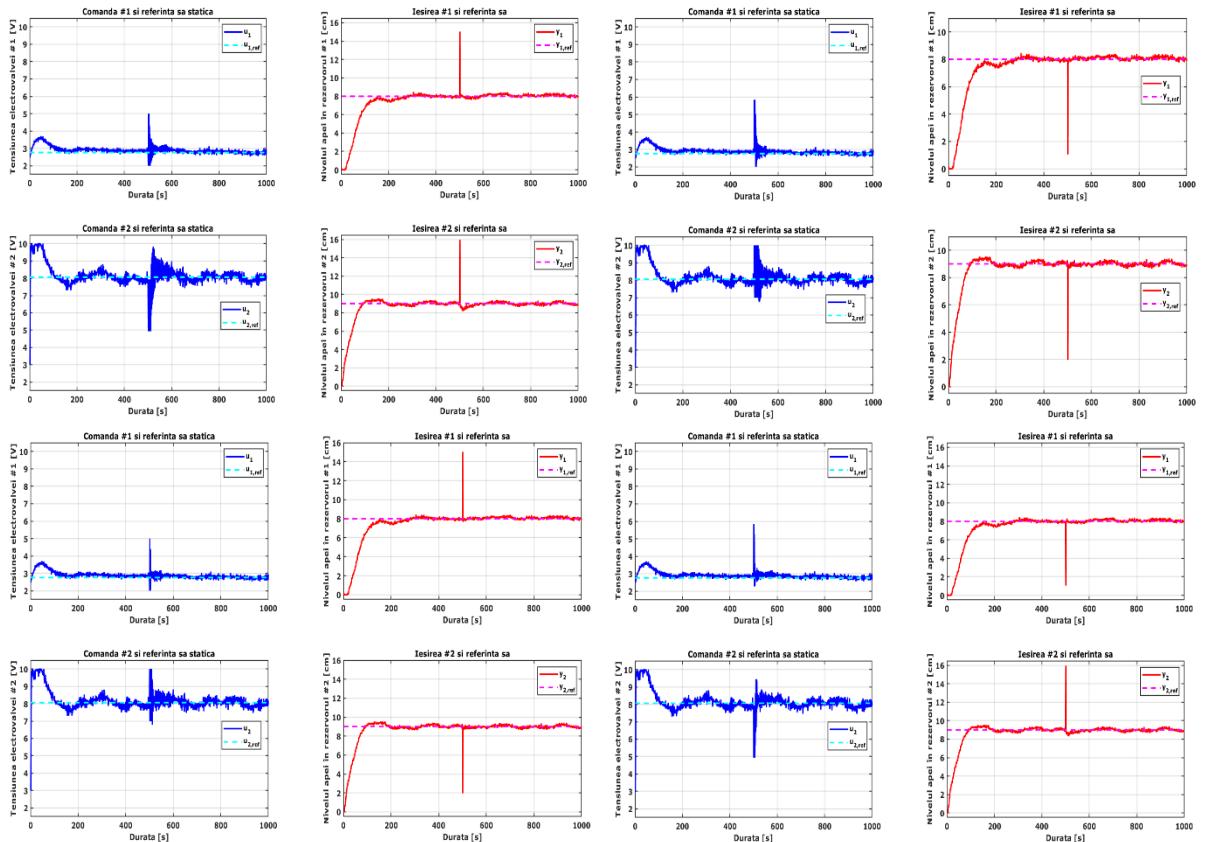


Figura 5.19. Rejecția impulsurilor de 7 cm, simultan, la 500 de secunde

5.3.3. Capacitatea de reacție a perturbațiilor persistente pe ieșiri

Asemănător cazului precedent, se introduc alte perturbații pe ieșiri, acestea fiind persistente, de tip treaptă. Introducerea lor se realizează mai întâi la momente diferite, după 400 de secunde de la începerea simulării pentru primul canal de ieșire și după 600 de secunde de la începerea simulării pentru cel de-al doilea canal. Pe urmă, perturbațiile se vor genera simultan, după 500 de secunde de la momentul pornirii simulării. Dimensiunile lor vor fi de ± 1 cm.

Rezultatele de simulare sunt afișare în Figurile 5.20 – 5.21. În aceste figuri, se observă că, dacă perturbațiile au același sens, ele sunt rejectate satisfăcător. Reacția este mai lentă când perturbațiile apar simultan, dar mai rapidă când acestea sunt defazate în timp. Limitarea majoră a acestui regulator PID apare când perturbațiile au semne opuse. În toate cazurile analizate, se observă că, deși referința pe canalul secund de ieșire este urmărită, pe primul canal se formează o eroare clară de urmărire. Aceasta este cauzată de comanda u_1 , care, fie se saturează inferior la 2 V, fie are o tendință crescătoare spre instabilitate.

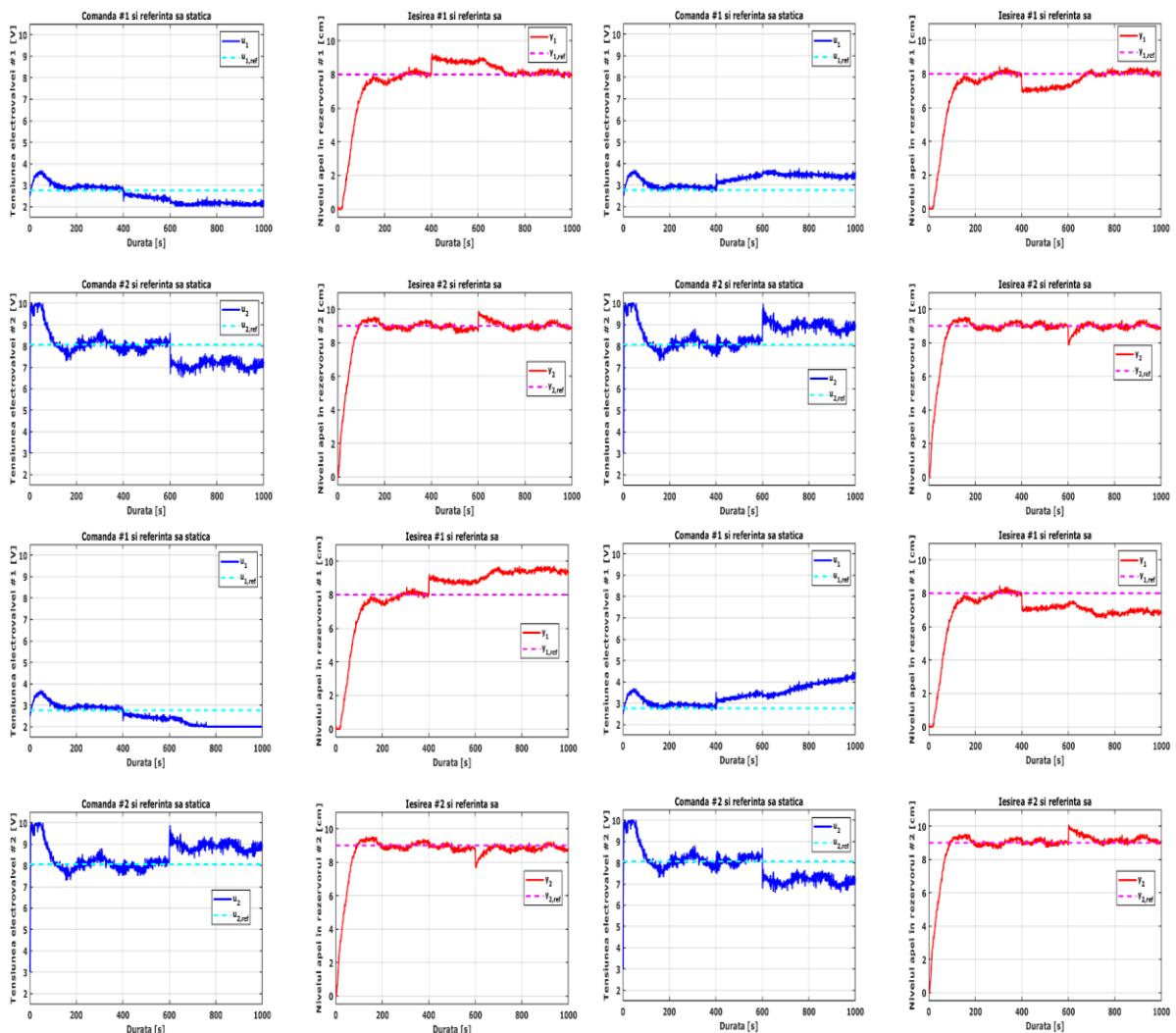


Figura 5.20. Reacția perturbațiilor persistente de tip treaptă de ± 1 cm , la momente diferite: 400, respectiv 600 de secunde

Control PID multi-variabil metaheuristic al unei instalații hidraulice.

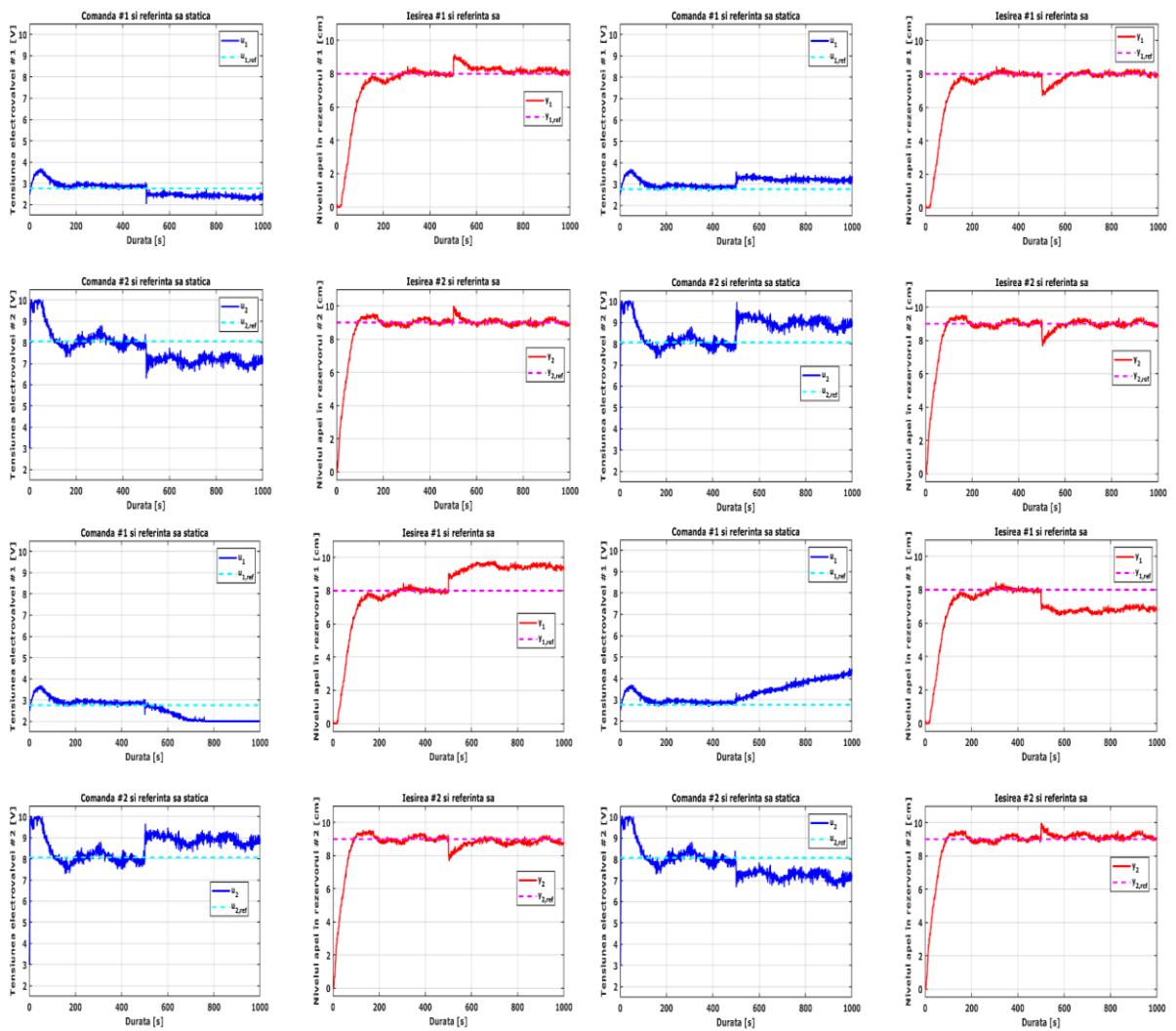


Figura 5.21. Rejecția perturbațiilor persistente de tip treaptă de ± 1 cm, în același timp, la 500 de secunde

5.3.4. Capacitatea de urmărire a unor referințe în scară

În cadrul acestei sub-secțiuni, se realizează două teste mai dificile:

- urmărirea unor succesiuni de trepte pe referințe, generate simultan;
- urmărirea unor referințe în scară, care apar la momente diferite.

Mai întâi, se analizează cazul treptelor sincronizate. Pentru fiecare rezervor, se generează consecutiv 8 referințe de tip treaptă. Acestea sunt:

- pentru primul rezervor, în această ordine: {8, 9.5, 7.5, 8.5, 9, 11, 10, 9} cm;
- pentru al doilea rezervor, în această ordine: {9, 11, 8, 8.5, 7, 9, 10, 8} cm.

Durata simulării este acum de 12000 s. Referințele apar succesiv la 0, 900, 2500, 4300, 5600, 7400, 8400, 10400, respectiv 12000 de secunde.

Rezultatele obținute în urma simulării sistemului în buclă închisă pentru aceste referințe sunt ilustrate în Figura 5.22. Aici, se poate observa cum urmărirea primei referințe nu este la fel de bună, în comparație cu cea a canalului secund. Primul rezervor al instalației ASTANK2 are peretele înclinat, care generează o dinamică neliniară mai puternică față de al doilea rezervor, fiind construit ca un paralelipiped obișnuit.

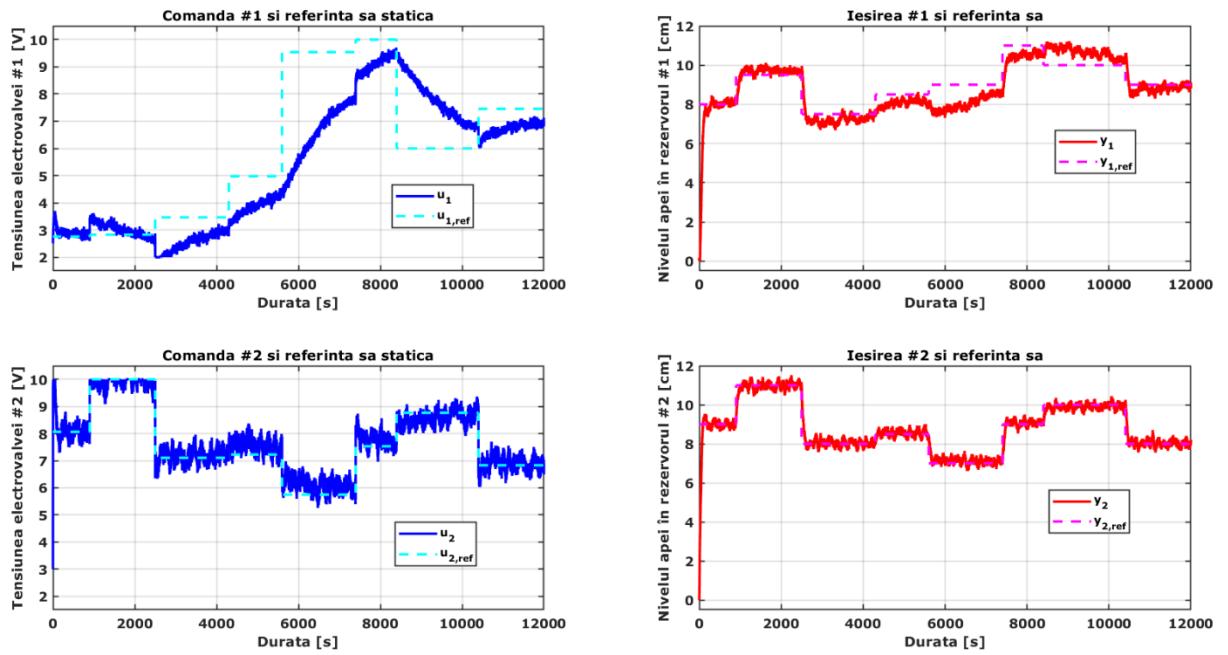


Figura 5.22. Performanțele sistemului în buclă închisă pentru succesiunea de trepte sincronizate

De asemenea, modelul de identificare al procesului este liniar. De aici rezultă că, primul model de identificare MISO liniar nu este la fel de precis ca al doilea model MISO atunci când se aproximează dinamica neliniară a instalației ASTANK2.

Mai departe, se analizează cazul treptelor defazate. Pentru fiecare rezervor, se generează consecutiv 11 referințe de tip treaptă. Acestea sunt:

- pentru primul rezervor, în această ordine: {8, 10, 9, 7, 9.5, 8.5, 7.5, 9, 11, 9.5, 8} cm;
- pentru al doilea rezervor, în această ordine: {9, 8.5, 10.5, 8, 10, 7, 8.5, 11, 9.5, 7.5, 9} cm.

Durata simulării rămâne setată la 12000 s. Pentru primul canal, referințele apar la 0, 1200, 2100, 2900, 3750, 4800, 5600, 6400, 7400, 8500, 9400, respectiv 12000 de secunde. Pentru al doilea canal, referințele apar la 0, 800, 1800, 2700, 3900, 4800, 5900, 6900, 7700, 8600, respectiv 12000 de secunde.

Rezultatele obținute în urma simulării sistemului în buclă închisă pentru aceste referințe sunt ilustrate în Figura 5.23. Aceasta ilustrează că, și în acest caz, ieșirea celui de-al doilea canal urmărește mai bine referința în comparație cu ieșirea primului canal. Modelul de identificare este liniar, însă, cele două componente ale lui nu au aceeași vecinătate de validitate. Pe primul canal, modelul este valid pe o vecinătate mai îngustă decât pe canalul al doilea, din cauza dinamicii neliniare. Această constatare este sugerată și de vecinătatea de buna funcționare a regulatorului PID. În zona albastră din planul orizontal al suprafetei de fitness(Figura 5.5), se observă că această vecinătate este mai largă de-a lungul axei referinței ieșirii 2 și mai îngustă de-a lungul axei referinței ieșirii 1. Prin urmare, este mai dificil de urmărit o astfel de referință în trepte pe primul canal, cu acest regulator.

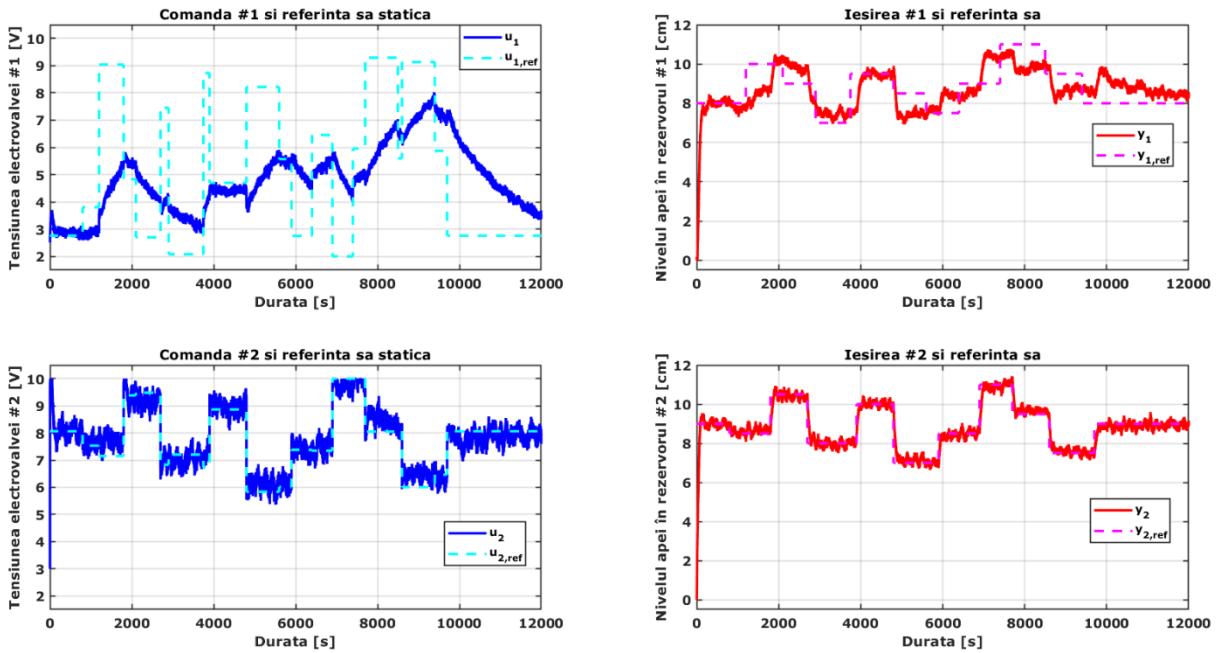


Figura 5.23. Performanțele sistemului în buclă închisă pentru succesiunea de trepte defazate

6. Concluzii și perspective

Scopul principal al acestei lucrări a fost acela de a realiza o analiză suficient de detaliată asupra controlului PID multi-variabil metaheuristic, aplicat unei instalații neliniare ca ASTANK2, fiind identificată ca două modele MISO liniare. În acest proiect, s-a investigat un regulator de tip PID multi-variabil cu două intrări și două ieșiri. Pentru a găsi parametrii optimi de reglare, s-a utilizat o metodă de optimizare metaheuristică: Algoritmul Lilieciilor, care execută o explorare amplă a spațiului de căutare pentru acordarea regulatorului. Definirea unei funcții cost potrivite pentru acest proces este o sarcină dificilă. Prin urmare, aceasta a fost adaptată la caracteristicile și limitările instalației.

Rezultatele simulărilor au dezvăluit atât capabilitățile, cât și limitările regulatorului optim proiectat. Acesta are capacitatea de a rejecta perturbații accidentale de tip impuls, precum și capacitatea de urmărire a unor referințe în scară.

Mai departe, se pot realiza alte cercetări pe teme asemănătoare, cum ar fi controlul RST multi-variabil metaheuristic. De asemenea, se poate reia căutarea unui regulator PID multi-variabil cu alte metode metaheuristice, precum: Algoritmul Genetic sau Algoritmul Licuricilor [ȘTE-14]. Totodată, se poate investiga controlul metaheuristic bazat pe reprezentarea în spațiul stărilor a instalației ASTANK2.

7. Contribuții originale ale studentului

1. Implementarea Algoritmului Lilieciilor, cu îmbunătățiri aduse în partea de viabilizare a soluțiilor optimale.
2. Implementarea schemei de simulare în buclă închisă, cu regulator PID multi-variabil, având două intrări și două ieșiri.

3. Definirea celor trei funcții criteriu succesive, până la găsirea celei mai bune dintre ele.
4. Adaptarea Algoritmului Lilieciilor la problema de optimizare a determinării regulatorului PID corespunzător maximului funcției criteriu.
5. Organizarea testelor aplicate regulatorului PID optimal.
6. Analizarea rezultatelor obținute în urma testării regulatorului PID optimal, cu indicarea avantajelor și limitărilor acestuia.

Bibliografie

- [CuŞtDu-15] Culiță Janetta, Ștefănoiu Dan, Dumitrașcu Alexandru, *ASTANK2: Analytical Modeling and Simulation*, 2015 20th International Conference on Control Systems and Computer Science, IEEE, 2015.
- [CuŞt-17] Culiță Janetta, Ștefănoiu Dan, *Multi-Model Identification of Pumping System in ASTANK2 Plant*, 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science, IEEE, 2017.
- [DUM-10] Dumitache Ioan, *Ingineria reglării automate*, Editura Politehnica Press, 2010
- [LUP-06] Lupu Ciprian, Petrescu Cătălin, Ciubotaru Bogdan, Dimon Cătălin, Popescu Dumitru, Ștefănoiu Dan, *Automatică Industrială*, Editura AGIR, 2006.
- [ŞtCu-20] Ștefănoiu Dan, Culiță Janetta, *Joint Stochastic Spline and Autoregressive Identification Aiming Order Reduction based on Noisy Sensor Data*, Sensors, MDPI, 2020.
- [ŞtCu-21] Ștefănoiu Dan, Culiță Janetta, *Optimal Identification and Metaheuristic PID Control of a Two-Tank System*, Electronics, MDPI, 2021.
- [ŞTE-14] Ștefănoiu Dan, Borne Pierre, Popescu Dumitru, Filip Florin Gheorghe, El Kamel Abdelkader, *Optimization in Engineering Sciences, Metaheuristics, Stochastic Methods and Decision Support*, Wiley, 2014.
- [WAN-20] Wang, P.C.; Zhou, Y.Q., Luo, Q.F.; Han, C.; Niu, Y.B.; Lei, M.Y., *Complex-valued encoding metaheuristic optimization algorithm: A comprehensive survey*, Neurocomputing, 2020, no.407, pp. 313-342