

Raport științific

privind implementarea proiectului în perioada mai– decembrie 2018

Contract TE 65/2018

**Robust fractional order event-based
control for optimized resource allocation in
complex cyber-physical closed loop systems**

Rezumat: În cadrul Etapei 1 de implementare a grantului de cercetare TE 65/2018 s-au urmărit a se realiza activități suport pentru etapele de dezvoltare a noilor algoritmi, așa cum s-a propus în propunerea de proiect.

În prima parte a acestui raport se va prezenta studiul strategiilor de control de tip fracționar existente la ora actuală pentru diferite tipuri de procese. Majoritatea strategiilor de control PID fracționar se bazează pe o acordare a reguletoarelor în domeniul frecvențial, pe baza a trei specificații de performanță. Există însă și alte variante, în cadrul acestui raport fiind prezentate cele mai populare.

În a doua parte a acestui raport se prezintă un studiu al reguletoarelor PID fracționare existente în literatura de specialitate și utilizate în reglarea proceselor cu timp mort (de menționat aici că nu există raportări cu privire la utilizarea acestora în sisteme de tip WSN – wireless sensors and actuators networks). Rezultatul acestui studiu a făcut obiectul unei lucrări de tip review, lucrarea respectivă fiind menționată în ultima secțiune a acestui raport.

În ultima parte a acestui raport se prezintă un studiu al celor mai noi concepte din domeniul reguletoarelor PID bazate pe evenimente (pe parcursul acestui raport se va face referire la acestea sub denumirea de event-based PID). Există o serie de abordări în acest domeniu relativ nou în ingineria reglării automate, urmând ca în acest raport să se prezinte succint cele mai des întâlnite metode și algoritmi.

În finalul acestui raport se prezintă succint lucrările realizate și finanțate din cadrul proiectului.

Activitatea 1.1. Studiu complet în ceea ce privește calculul fracționar în aplicații de reglare de procese

Prima apariție a teoriei calculului fracționar în aplicații de reglare de procese datează din 1945 (Monje, 2010). Ulterior în 1958, Tustin a propus utilizarea teoriei calculului fracționar pentru sisteme de poziționare, propunând în fapt o funcție de transfer de ordin fracționar pentru sistemele în buclă deschisă în așa fel încât să fie asigurată o anumită margine de fază în jurul frecvenței de tăiere (Manabe, 1961). Ideea este reluată mai tarziu prin utilizarea unui regulator de

ordin fracționar pentru controlul altitudinii navelor spațiale flexibile (Manabe, 2002). Idei similare au dus la dezvoltarea primei, celei de a doua și a treia generație de regulatoare fracționare CRONE (Oustaloup, 1993; Xue, 2002). Acordarea reguletoarelor CRONE se realiza în domeniul frecvențial, mai puțin accesibil non-cercetătorilor. În 1995 și 1997, J. Machado propune un algoritm pentru implementare reguletoarelor de ordin fracționar în domeniul timp (Machado, 1995; Machado, 1997).

Prima apariție a reguletoarelor PID fracționare datează din 1997 (Podlubny, 1997). Reguletoarele PID fracționare (FO-PID) reprezintă o generalizare a reguletoarelor clasice PID (Podlubny, 1997), avînd funcția de transfer dată de:

$$H_{FO-PID}(s) = k_p \left(1 + k_i s^{-\lambda} + k_d s^{\mu} \right) \quad (1)$$

unde k_p , k_d și k_i sunt constantele de proporționalitate, integrare și derivare, iar $\mu, \lambda \in (0,1)$ sunt ordinele fracționare. O metodă bazată pe teorema Hermite Biehler este utilizată pentru definirea parametrilor unui FO-PID care să asigure stabilitatea în buclă închisă a sistemelor cu timp mort (Caponetto, 2010). O metodă analitică de acordare a reguletoarelor de ordin fracționar constă în alegerea ordinelor fracționare $\mu = \lambda$ și impunerea unei marginii de fază la o anumită frecvență de tăiere, precum și o anumită margine de câștig la frecvența la care faza sistemului va avea -180 grade (Vinagre, 2001). Caponetto (Caponetto, 2004) propune alegerea unui anumit ordin fracționar $\lambda = \mu > 1$ și apoi acordarea reguletoarelor de tip FO-PID prin impunerea unei margini de fază la o anumită frecvență de tăiere. Ulterior s-a extins metoda propusă în (Vinagre, 2001) pentru un sistem fracționar și fără a mai ține cont de constrângerea ca $\lambda = \mu$ (Zhao, 2005). O idee similară, de acordare a reguletoarelor FO-PI se bazează pe metoda simetriei din teoria reglării clasice, însă doar pentru anumite tipuri de procese (Maione, 2007).

Ulterior apare și ideea acordării reguletoarelor FO-PI prin extinderea setului de performanțe amintit mai sus în așa fel încât să includă și condiția unei faze constante în jurul frecvenței de tăiere (Chen, 2006; Muresan, 2013; Monje, 2010). Ecuațiile utilizate cel mai des în proiectarea unor reguletoare de tip FO-PID se deduc din cele 5 specificații de proiectare

1. Ecuația de modul, corespunzătoare unei anumite frecvențe de tăiere, presupune:

$$\left| H_{FO-PID}(j\omega_{gc}) \right| M_m = 1 \quad (2)$$

unde M_m este modulul procesului și ω_{gc} este frecvența de tăiere impusă.

2. Ecuația de fază presupune:

$$\angle H_{FO-PID}(j\omega_{gc}) + \phi_m = -\pi + PM \quad (3)$$

unde ϕ_m este faza procesului la frecvența de tăiere și PM este marginea de fază impusă.

3. Condiția de robustețe (iso-damping) presupune:

$$\left. \frac{d(\angle H_{FO-PID}(j\omega))}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_{gc}} + \left. \frac{d(\phi_m)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_{gc}} = 0 \quad (4)$$

4. Rejectarea zgomotelor la frecvențe înalte:

$$\left| T(j\omega) = \frac{H_{FO-PID}(j\omega) \cdot H_P(j\omega)}{1 + H_{FO-PID}(j\omega) \cdot H_P(j\omega)} \right| \leq AdB, \quad \omega \geq \omega_T \quad (5)$$

5. Rejectarea perturbațiilor la frecvențe joase:

$$\left| S(j\omega) = \frac{1}{1 + H_{FO-PID}(j\omega) \cdot H_P(j\omega)} \right| \leq BdB, \quad \omega \leq \omega_S \quad (6)$$

Aceiași idee este reluată în (Monje, 2006) pentru regulatoare de tip FO-PID, cu o structura aparte. Pentru procese descrise de funcții de transfer de ordin fracționar și având și timp mort, se propune alegerea ordinelor fracționare de integrare și derivare în așa fel încât un set de condiții să fie îndeplinit (Monje, 2006).

IMC (Internal Model Control) este o altă metodă de acordare a reguletoarelor de tip FO-PID (Tavakoli-Kakhki, 2011; Muresan, 2016).

În (Chen, 2008) se propune acordarea unor regulatoare de tip FO-PI folosind algoritmul F-MIGO (fractional constrained integral gain optimization), o extindere a algoritmului clasic, care impune maximizarea funcțiilor de senzitivitate și senzitivitate complementară asigurând ca funcția de transfer în buclă deschisă să nu intre în cercul de rază R și centru $(-C, 0)$, valorile

efective ale acestor parametri fiind definite în (Chen, 2008). Deși analitic, algoritmul necesită și obținerea unei soluții utilizând metode numerice precum Newton-Raphson.

Diferite variante de regulatoare fracționare PID au fost propuse cu o structură ușor diferită față de cea standard din ecuația (1). Astfel de exemple se regăsesc în (Feliu-Batlle, 2007; Feliu-Batlle, 2009; Luo, 2009; El-Khazali, 2013).

Pe lângă aceste metode analitice, există și metode numerice de acordare a reguletoarelor FO-PID. Aceste variante se bazează pe evaluarea numerică a unei funcții de cost, care determină măsura în care o serie de specificații de proiectare sunt îndeplinite. O metodă de optimizare numerică este apoi utilizată pentru a determina parametri regulatorului care optimizează funcția de cost. De exemplu, în (Monje, 2004; Monje, 2008) algoritmul simplex este utilizat pentru a minimiza una din specificațiile de proiectare, în timp ce alte patru specificații sunt considerate ca și constrângeri. Specificațiile se referă cel mai adesea la o valoare minimă pentru ordinul fracționar de integrare λ , valori pentru frecvența de tăiere și marginea de fază, valori pentru frecvența la care faza sistemului în buclă deschisă va avea -180 grade și marginea de câștig, condiția de iso-damping (fază constantă în jurul frecvenței de tăiere), rejectarea zgomotelor la frecvențe înalte sau rejectarea perturbațiilor la frecvențe joase. Un alt exemplu de metodă numerică se regăsește în (Maiti, 2008) unde se folosește algoritmul PSO (Particle Swarm Optimisation) pentru a optimiza timpul de răspuns al sistemului în buclă închisă.

Un review cuprinzător al metodelor de acordare a reguletoarelor FO-PID se regăsește în (Valerio, 2010; Valerio, 2011). Alte lucrări care prezintă stadiul actual în domeniul reguletoarelor de ordin fracționar sunt (Leng, 2014; Shah, 2016).

Auto-acordarea reguletoarelor fracționare este un subiect relativ puțin abordat de către cercetătorii în domeniu. O astfel de abordare presupune utilizarea unui regulator PID clasic alături de un element de integrare/diferențiere de ordin fracționar s^α , cu $\alpha \in (-1, 1)$, acest element fiind denumit ca și “phase shaper” (Chen, 2004). Ideea de bază în proiectare constă în asigurarea condiției de iso-damping. În (Monje, 2008), metoda releului este utilizată în procedeul de auto-acordare, metoda fiind extinsă de la reguletoarele standard PID la cele fracționare. Regulatorul final se determină în două etape: prima constă în proiectarea unui FO-PI, urmat de un FO-PD cu un filtru. Metoda de design a celor două componente FO-PI, respectiv FO-PD cu filtru se bazează pe specificația de iso-damping, pe asigurarea unei anumite frecvențe de tăiere și a unei

anumite margini de fază. Procedura este anevoioasă și de durată și urmărește minimizarea robusteții la variația factorului de amplificare în buclă deschisă. O metodă diferită de auto-acordare se propune în (Yeroglu, 2009) fiind inspirată din metodele clasice Ziegler-Nichols și Åström-Hägglund. Metoda Ziegler-Nichols este utilizată mai întâi pentru a determina constantele de proporționalitate și integrare, în timp ce valoarea inițială a constantei de derivare se calculează prin metoda Åström-Hägglund. Aceleași specificații de proiectare sunt utilizate și în acest caz. Metoda presupune și o optimizare pentru determinarea parametrilor optimi. În 2013, metoda Ziegler-Nichols a fost utilizată pentru determinarea parametrilor de derivare și integrare ai unui regulator FO-PID (Sierociuk, 2013). Ulterior ordinele de integrare și derivare s-au calculat prin minimizarea diferitelor funcții de cost. Tot metoda Ziegler-Nichols este utilizată și în (Valerio, 2006a), însă metoda propusă se aplică proceselor modelate prin funcții de transfer de ordin întâi și cu timp mort.

O altă variantă de auto-acordare se bazează pe determinarea inițială a modulului, fazei și derivatei fazei procesului la frecvența de tăiere impusă ca și specificație de proiectare. Modulul și faza procesului se obțin clasic din datele din domeniul frecvențial, în timp ce o metodă nouă este utilizată pentru determinarea derivatei fazei (De Keyser, 2016). Având aceste informații, regulatoarele de tip FO-PI sau FO-PD se calculează pe baza a trei specificații de proiectare: frecvență de tăiere, margine de fază și iso-damping. O variantă similară de auto-acordare a regulatoarelor de tip FO-PI/FO-PD constă în extinderea unui algoritm de auto-acordare a regulatoarelor PID (De Keyser, 2017). Metoda se bazează pe definirea unei regiuni “nepermise” în domeniul Nyquist, care să includă punctul -1, regiunea fiind determinată pe baza condiției de iso-damping și a valorii impuse ca și specificație de proiectare pentru marginea de fază. Ideea de bază în design-ul regulatorului fracționar constă în determinarea optimă a parametrilor regulatorului astfel ca răspunsul sistemului în buclă închisă să fie tangent regiunii definite, pentru frecvența de tăiere. Algoritmul constă în minimizarea unei funcții de cost definită ca diferența dintre panta răspunsului frecvențial și al regiunii. Ideea este redată în Fig. 1., unde PM – margine de fază, $P(j\omega)$ – proces, $C(j\omega)$ – regulator fracționar.

În afară de metodele menționate în prezentul raport există și o serie de algoritmi care îmbină calculul fracționar cu algoritmi avansați de reglare. O metoda de sliding-mode robustă este prezentată în (Delavari, 2010a; Wang, 2012); algoritmi de reglare predictivi de ordin

fracționar sunt analizați în (Romero, 2008; Romero, 2009); algoritmi fuzzy fracționari, adaptivi (Liu, 2015; Delavari, 2010b; Barbosa, 2010). În (Cervera, 2006; Petras, 2002; Valerio, 2006b) sunt proiectate regulatoare robuste de ordin fracționar prin minimizarea normelor H_2 și H_∞ . În (Lavado, 2010) se prezintă un algoritm fracționar de tip gain-scheduling pentru controlul proceselor cu timp mort și constantă de timp variabilă.

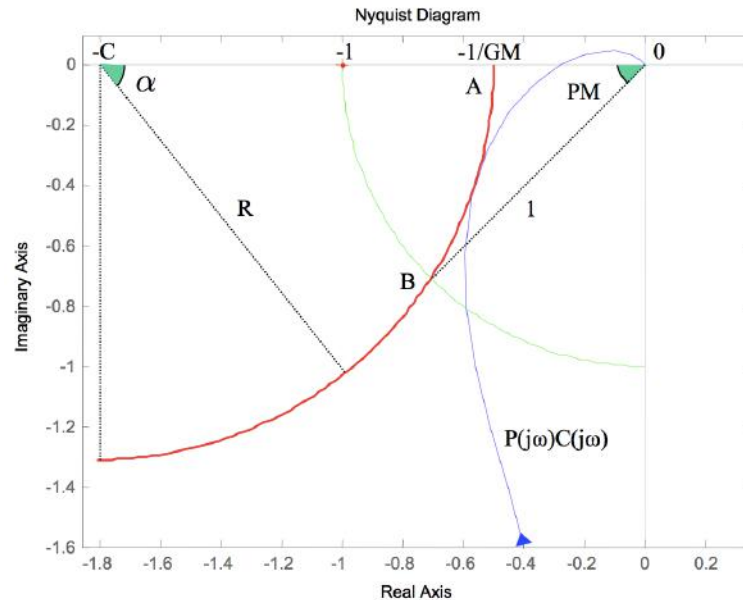


Figura. 1. Răspunsul frecvențial al sistemului în buclă deschisă (albastru) și regiunea “nepermisă”

Referinte:

1. Barbosa, R.: On linear fuzzy fractional PD and PD+I controllers. In: Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications (FDA'10) (2010)
2. Caponetto, R., Fortuna, L., and Porto, D. (2004). A new tuning strategy for a non integer order PID controller. In Fractional Differentiation and its Applications. Bordeaux.
3. Caponetto R, Dongola G, Fortuna L, Gallo A. New results on the synthesis of FO-PID controllers. Commun Nonlinear Sci Numer Simul 2010;15(4):997–1007.
4. Cervera, J., Baños, A., Monje, C.A., Vinagre, B.M.: Tuning of fractional PID controllers by using QFT. In: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society (2006)
5. Chen YQ, Moore KL, Vinagre BM, Podlubny I. Robust PID controller autotuning with a phase shaper. In: Proceedings of the First IFAC workshop on fractional differentiation and its applications, Bordeaux, France, 2004. p. 162–167.

6. Chen, Y., Dou, H., Vinagre, B.M., and Monje, C.A. (2006). A robust tuning method for fractional order pi controllers. In *Fractional Differentiation and its Applications*. Porto.
7. Chen, Y., Bhaskaran, T., and Xue, D. (2008). Practical tuning rule development for fractional order proportional and integral controllers. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 3, 021403.
8. Delavari H, Ranjbar A, Ghaderi R, Momani S. Fractional order control of a coupled tank. *Nonlinear Dyn* 2010a;61(3):383–97.
9. Delavari, H., Ghaderi, R., Ranjbar, A., HosseinNia, S., Momani, S.: Adaptive fractional PID controller for robot manipulator. In: *Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications (FDA'10)* (2010b)
10. El-Khazali R. Fractional-order $PI\lambda D\mu$ controller design. *Computers & Mathematics with Applications* 2013;66(5):639–46.
11. Feliu-Batlle V, Perez RR, Rodriguez LS. Fractional robust control of main irrigation canals with variable dynamic parameters. *Control Eng Prac* 2007;15(6):673–86.
12. Feliu-Batlle V, Pérez RR, Garcia FC, Rodriguez LS. Smith predictor based robust fractional order control: Application to water distribution in a main irrigation canal pool. *J Process Control* 2009;19(3):506–19.
13. De Keyser, R., Muresan, C.I., Ionescu, C. (2016), A Novel Auto-tuning Method for Fractional Order PI/PD Controllers, *ISA Transactions*, Vol. 62, pp. 268-275, DOI: 10.1016/j.isatra.2016.01.021
14. De Keyser, R., Ionescu, C.M., Muresan C.I. (2017), Comparative Evaluation of a Novel Principle for PID Autotuning, *Proceedings of the 11th Asian Control Conference (ASCC)*, pp. 1164-1169, DOI: 10.1109/ASCC.2017.8287335, 17-20 December 2017, Gold Coast, Australia
15. Lavado, F., Tejado, I., Vinagre, B.M.. Gain scheduled fractional order PI controller for irrigation canals with variable dynamics. In: *Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications (FDA'10)* (2010)
16. B. Y. Leng et al., "Review of Fractional Order Control", *Advanced Materials Research*, Vols. 1049-1050, pp. 983-986, 2014
17. Liu L, Pan F, Xue D. Variable-order fuzzy fractional PID controller. *ISA transactions* 2015; 55: 227–33.
18. Luo Y, Chen Y. Fractional order [proportional derivative] controller for a class of fractional order systems. *Automatica* 2009;45(10):2446–50.
19. Machado JT. Theory of fractional integrals and derivatives: Application to motion control. In: *International conference on recent advances in mechatronics*. IEEE; 1995. p. 1086–91.
20. Machado JT. Analysis and design of fractional-order digital control systems. *Syst Anal Model Simul* 1997;27(2-3):107–22.
21. Maione, G. and Lino, P. (2007). New tuning rules for fractional $PI\alpha$ controllers. *Nonlinear dynamics*, 49, 251–257.
22. Maiti, D., Acharya, A., Chakraborty, M., Konar, A., and Janarthanan, R. (2008a). Tuning PID and $PI\lambda D\mu$ controllers using the integral time absolute error criterion. In *Information and Automation for*

Sustainability. Colombo.

23. Manabe S. The non-integer integral and its application to control systems. ETJ Japan 1961;6(3-4):83–7.
24. Manabe S. A suggestion of fractional-order controller for flexible spacecraft attitude control. Nonlinear Dyn 2002;29(1-4):251–68.
25. Monje, C.A., Vinagre, B.M., Chen, Y.Q., Feliu, V., Lanusse, P., and Sabatier, J. (2004). Proposals for fractional PI λ D μ tuning. In Fractional Differentiation and its Applications. Bordeaux.
26. Monje, C.A., Vinagre, B.M., Feliu, V., and Chen, Y. (2006). On auto-tuning of fractional order PI λ D μ controllers. In Fractional Differentiation and its Applications. Porto.
27. Monje, C.A., Vinagre, B.M., Feliu, V., and Chen, Y. (2008). Tuning and auto-tuning of fractional order controllers for industry applications. Control Engineering Practice, 16(798–812).
28. Monje CA, Chen Y, Vinagre BM, Xue D, Feliu-Batlle V. Fractional-order systems and controls: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media; 2010
29. Muresan, C.I., Folea, S., Mois, G., Dulf, E.H. (2013), Development and Implementation of an FPGA Based Fractional Order Controller for a DC Motor, Elsevier Journal of Mechatronics, vol. 23, no. 7, pp. 798-804
30. Muresan, C.I., Dutta, A., Dulf, E.H., Pinar, Z., Maxim, A., Ionescu, C.M. (2016), Tuning algorithms for fractional order internal model controllers for time delay processes, International Journal of Control, Vol. 89, No. 3, pp. 579-593, DOI: 10.1080/00207179.2015.1086027
31. Oustaloup A, Bansard M. First generation crone control. In: Systems, man and cybernetics, 1993.'systems engineering in the service of humans', conference proceedings, international conference on. IEEE; 1993. p. 130–5.
32. Petráš, I., Hypiusova, M.: Design of fractional-order controllers via H^∞ norm minimisation. Sel. Top. Model. Control 3, 50–54 (2002)
33. Podlubny I, Dorcak L, Kostial I. On fractional derivatives, fractional-order dynamic systems and PI λ D μ controllers. In: Proceedings of the 36th conference on decision & control, vol. 5; 1997. p. 4985–90.
34. Pritesh Shah, Sudhir Agashe, Review of fractional PID controller, Mechatronics, vol. 38, pp. 29-41, 2016
35. Romero, M., Tejado, I., Vinagre, B.M., de Madrid, A.P.: Fractional-order generalized predictive control of a servomotor plant. In: Proceedings of the 3rd IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications (FDA'08) (2008)
36. Romero, M., Tejado, I., Vinagre, B.M., de Madrid, A.P.: Position and velocity control of a servo by using GPC of arbitrary real order. In: New Trends in Nanotechnology and Fractional Calculus Applications, pp. 369–376. Springer, Berlin (2009)
37. Sierociuk D, Macias M. Comparison of variable fractional order PID controller for different types of variable order derivatives. In: Carpathian control conference (ICCC), 2013 14th international. IEEE; 2013. p. 334–9.
38. Tavakoli-Kakhki M, Haeri M. Fractional order model reduction approach based on retention of the dominant dynamics: Application in IMC based tuning of FOPI and FOPID controllers. ISA Trans

2011;50(3):432–42.

39. Valerio D, da Costa JS. Tuning of fractional PID controllers with Ziegler–Nichols-type rules. *Signal Proces* 2006a;86(10):2771–84.
40. Valério, D., da Costa, J.S.: Tuning of fractional controllers minimising H_2 and H_∞ norms. *Acta Polytech. Hung.* 3(4), 55–70 (2006b)
41. Valerio D, da Costa JS. A review of tuning methods for fractional PIDs. 4th IFAC workshop on fractional differentiation and its applications, FDA, 10; 2010.
42. Valerio D, Sa da Costa J. Introduction to single-input, single-output fractional control. *Control Theor Appl IET* 2011;5(8):1033–57.
43. Vinagre, B. (2001). Modelado y control de sistemas dinamicos caracterizados por ecuaciones integro-diferenciales de orden fraccional. Ph.D. thesis, Universidad Nacional de Educacion a Distancia, Madrid.
44. Wang Z, Huang X, Shen H. Control of an uncertain fractional order economic system via adaptive sliding mode. *Neurocomputing* 2012;83:83–8.
45. Xue D, Chen Y. A comparative introduction of four fractional order controllers. In: *Intelligent control and automation, 2002. proceedings of the 4th World congress on*, vol. 4. IEEE; 2002. p. 3228–35.
46. Yeroglu C, Onat C, Tan N. A new tuning method for $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller. In: *Proceedings of the International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO 2009 II*, Bursa, turkey, 2009. p. 312–316.
47. Zhao, C., Xue, D., and Chen, Y. (2005). A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order plants. In *International Conference on Mechatronics & Automation*. Niagara Falls.

Activitatea 1.2. Studiu complet cu privire la regulatoarele FO-PID existente pentru controlul proceselor cu timp mort (sisteme WSAN)

Industria oferă un amalgam de procese cu timp mort de diverse ordine precum schimbătoare de căldura, industria minieră, manufacturarea oțelului, industria petrochimică. Cu excepția proceselor cu timp mort native, unele bucle de control prezintă întârzieri datorită senzorilor și actuatorilor utilizați. În toate buclele de control realizate prin rețele de senzori cu tehnologii wireless (Wireless Sensor and Actuator Network, WSAN) sunt prezente întârzieri ale semnalelor, crescând dificultatea acordării eficiente a algoritmilor de control. Procesele cu întârzieri sunt întâlnite într-o gamă largă de domenii, de la sisteme biologice la sisteme mecanice, incluzând de asemenea domeniile economice și electrice. Fenomenele fizice care stau la baza apariției întârzierilor constau în nevoia de a transporta informația, energia sau diverse mase, comunicarea între sistemele interconectate, timpul necesar senzorilor să capteze informații

sau a actuatorilor să acționeze precum și timpul necesar unui microcontroller să calculeze semnalul de comandă aferent unei legi de control.

Din punct de vedere al domeniului frecvențial, prezența timpului mort introduce o întârziere de fază în reprezentarea grafică, ducând la o valoare scăzută a marginilor de fază și de câștig. Astfel, procesul cu timp mort devine mai dificil din punct de vedere al controlului. Situația ideală este dezvoltarea unei strategii de control care să reducă efectul timpului mort la 0. De-a lungul anilor, au fost dezvoltate strategii de control specializate pe procese cu timp mort, precum (Prasad and Krishnaswamy, 1975; Bozorg and Davison, 2006; Watanabe et al., 1996; Tang et al., 2002) dar niciuna nu oferă soluția ideală. Pe măsură de domeniul calcului fracționar a devenit din ce în ce mai popular, strategiile de control au început să se concentreze pe extinderea reguletoarelor fracționare (prezentate la Activitatea 1.1) și generalizarea acestora pentru cazul proceselor cu întârzieri de diverse ordine.

Studii cu privire la acordarea reguletoarelor fracționare de diferite tipuri au fost publicate recent (Valerio and da Costa, 2010). Unele din metodele prezentate pot fi utilizate pentru acordarea reguletoarelor fracționare pentru procese cu timp mort. Majoritatea aplicațiilor ignoră timpul mort în procesul de acordare. Pentru obținerea unor rezultate mai bune, timpul mort ar trebui luat în considerare, iar algoritmi de control ar trebui generalizați să includă toate aspectele procesului. Studiul de la Activitatea 1.2 se concentrează pe studiul reguletoarelor fracționare pentru procese cu timp mort, în a căror proces de acordare, timpul mort nu este neglijat, cu scopul de a sintetiza metodele disponibile cu aplicabilitate în rețelele WSN.

Alegerea strategiilor FO-PID fracționare în favoarea reguletoarelor PID clasice, de ordin întreg, este justificată prin comparația explicită a rezultatelor obținute cu ambele tipuri de reguletoare pentru procese cu timp mort în (Padula and Visioli, 2011; Gopinath, 2013; Sadati et al., 2012; Luo and Chen, 2012; Hamamci and Koksall, 2010; Bhaskaran et al., 2007; Bhambhani et al., 2008; Malek et al., 2013; Ruszewski and Sobolewski, 2012; Hmed et al., 2017). O analiză completă a efectelor acțiunii derivate de ordin fracționar asupra unui proces de ordinul I, cu timp mort, instabil este prezentată în (Cheng and Hwang, 2006), unde este studiată influența diferențierii fracționare cu ordine cuprinse în intervalul $(0, 2)$. Lucrarea demonstrează analitic și prin intermediul simulărilor numerice că un derivator cu ordinul diferențierii $\mu < 1$ oferă un sistem în buclă închisă mai stabil decât un regulator clasic.

Printre cele mai populare metode de acordare ale reguletoarelor fracționare PID este abordarea prin care determinarea celor 5 parametri necesari se face prin rezolvarea sistemului de ecuații (2, 3, 4, 5, 6) prezentate la Activitatea 1.1. Metoda este versatilă și poate fi generalizată pentru orice fel de proces, atât cu timp mort sau fără. Particularitățile sistemului care trebuie controlat dictează constrângerile frecvențiale pe care regulatorul trebuie să le îndeplinească. Studii precum (Monje et al., 2010; Shekher et al., 2011; Luo and Chen, 2012; Xin et al., 2015; Moghaddam et al., 2011) abordează acordarea reguletoarelor FO-PID pentru procese cu timp mort prin această metodă de reglare. Este necesară impunerea tuturor specificațiilor frecvențiale: margine de fază, frecvență de tăiere, robustețe, sensibilitate și sensibilitate complementară doar pentru cazurile în care se dorește acordarea unui regulator de tipul FO-PID. Pentru reguletoarele de tip FO-PI sau FO-PD este suficientă impunerea unui sistem format din trei ecuații. Cele mai comune combinații întâlnite în literatură sunt constrângerile legate de marginea de fază, frecvența de tăiere și robustețea. Un asemenea exemplu este prezentat în (Birs et al., 2018) pentru acordarea unui regulator FO-PD pentru un proces de ordinul I cu timp mort. Studiul (Monje et al., 2010) prezintă aceeași strategie de control aplicată unui proces de ordinul II cu timp mort, iar (Gopinath, 2013) controlează nivelul dintr-un rezervor sferic folosind reguletoare FO-PI.

Reguletoare FO-PID acordate folosind cele 5 specificații frecvențiale pentru procese de ordin fracționar cu timp mort sunt prezentate în (Das et al., 2011). Mai multe modele sunt identificate pentru același proces în puncte de funcționare diferite, acordând cate un regulator FO-PID pentru fiecare dintre acestea. Tot un regulator FO-PID este acordat și în (Vinopra et al., 2010) pentru a stabili un proces de ordinul I cu timp mort utilizând metoda grafică pentru a rezolva setul de ecuații.

O analiză complexă privind stabilizarea proceselor de ordinul I cu timp mort a fost realizată de (Luo and Chen, 2012) unde sunt prezentate, pe lângă acordarea FO-PID și un set de reguli pentru alegerea optimă a specificațiilor de design aplicabile proceselor cu timp mort.

În afara acordării reguletoarelor rezolvând cele 5 ecuații frecvențiale, o parte din acestea sunt adesea combinate cu impunerea unor indecși de performanță precum Integral Absolute Error sau Integral Squared Error

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (7)$$

$$IAE = \int_0^\infty t|e(t)|dt \quad (8)$$

Studiile (Gude and Kahoraho, 2009) și (Merrikh-Bayat, 2018) abordează ISE și ITAE combinate cu abilitatea de rejectare a perturbațiilor pentru procese cu timp mort normalizat între 0.1 și 3.5 secunde. Aceeași indecși de performanță sunt utilizați de (Sahu et al., 2013; Debbarma et al., 2014) pentru a acorda regulatoare PID de ordin fracționar prin algoritmi de tipul Differential Evolution (DE).

O altă posibilitate de acordare a reguletoarelor fracționare PID dedicate proceselor cu timp mort constă în tehnici D-Decomposition detaliate de (Hamidian and Jalali, 2011) și (Hamamci and Koksall, 2010). Tehnica D-Decomposition se definește prin

1. Real Root Boundary (RRB): axa imaginară este intersectată de o rădăcină $s=0$, RRB se determină prin înlocuirea $s=0$ în ecuația caracteristică.
2. Complex Root Boundary (CRB): axa imaginară este intersectată de o rădăcină reală $s=jw$, cauzând instabilitatea sistemului
3. Infinite Root Boundary: axa imagară este intersectată de o rădăcină reală $s=j\infty$

unde polinomul caracteristic este dat de

$$P(s) = p_k s^{q_k} + \dots + p_1 s^{q_1} + p_0 \quad (9)$$

iar p_i sunt coeficienți și q_i reprezintă ordine fracționare. Studiile (Hamidian and Jalali, 2011) și (Hamamci and Koksall, 2010) detaliază acordarea reguletoarelor PI, respectiv PD fracționare, iar (Hamamci, 2007) generalizează algoritmul în cazul regulatorului PID de ordin fracționar.

Una dintre cele mai facile metode din punct de vedere al efortului de acordare este Ziegler-Nichols, pe baza cărora a fost dezvoltată metoda F-MIGO, Fractional M_s Constrained Integral Optimization. Procedura constă în optimizarea rejectării perturbațiilor prin impunerea constrângerilor asupra valorii maxime de senzitivitate. Metoda se bazează pe presupunerea că funcția de transfer este cunoscută, liniară, cu un număr finit de poli și cu o singularitate unică la infinit. Marginile de senzitivitate și senzitivitate complementară sunt date de:

$$M_s = \max_{0 < \omega < \infty} |S(j\omega)| \quad (10)$$

$$M_p = \max_{0 < \omega < \infty} |T(j\omega)| \quad (11)$$

Abordările MIGO de ordin întreg au demonstrat că alegerea marginii de sensibilitate din ecuația (10) ca parametru de acordare aduce îmbunătățiri semnificative în timpul de răspuns al sistemului în buclă închisă. Din moment ce există un compromis între sensibilitate și sensibilitate complementară, este important ca valorile ecuației (11) să fie minime. Această problemă este rezolvată de alegerea unui cerc pentru înglobarea M_s și M_p . Problema de optimizare F-MIGO este dată de ecuațiile:

$$f(k, k_i, \omega, \alpha) = |1 + C(j\omega)G(j\omega)|^2, \quad f(k, k_i, \omega, \alpha) \geq R^2 \quad (12)$$

unde R este raza cercului. Procedura de design este optimizarea lui k_i , factorul de amplificare integrator, ținând cont de de specificația de sensibilitate impusă în (13).

O metodă practică pentru acordarea unui regulator PI fracționar pentru procese cu timp mort de ordinul I folosind F-MIGO este detaliată de (Chen et al., 2008) și (Bhaskaran et al., 2007). Valorile optime ale ordinului fracționar de integrare cât și a factorilor de amplificare integratori și proporționali sunt determinate ținând cont de valoarea timpului mort. De asemenea, (Bhaskaran et al., 2007) demonstrează că metoda este aplicabilă oricărui proces cu timp mort, indiferent de complexitatea acestuia.

Un studiu detaliat cu privire la metoda F-MIGO aplicată proceselor cu timp mort este prezentat de (Bhambhani et al., 2008), unde se consideră 100 de procese diferite de ordinul I cu valori diferite ale parametrilor și ale timpului mort pentru care se calculează regulatoare PI fracționare.

O abordare diferită în acordarea reguletoarelor PID fracționare sunt metodele matematice bazate pe teoremele Pontryagin și Hermite-Biehler detaliată de (Sadalla et al., 2017; Hafsi et al., 2013; Hafsi et al., 2014; Gharab et al., 2017).

Teorema Hermite-Biehler este descrisă prin:

$$\delta^*(j\omega) = \delta_r^*(\omega) + j\delta_i^*(\omega) \quad (13)$$

unde δ_r^* și δ_i^* sunt părțile reale și imaginare ale funcției complexe δ . Funcția este stabilă dacă și numai dacă

1. δ_r^* și δ_i^* au rădăcini reale
2. Există $\omega = \bar{\omega}$ în $\mathbb{R}$ astfel încât $\delta_i'^*(\omega)\delta_r^*(\omega) - \delta_i^*(\omega)\delta_r'^*(\omega) > 0$ unde $\delta_i'^*(\omega)$ și $\delta_r'^*(\omega)$ sunt derivatele părților reale și imaginare.

Scopul este ca toate rădăcinile δ_r^* și δ_i^* să fie reale, lucru realizat utilizând teorema Pontryagin:

$$-2l\pi + \eta \leq \omega \leq 2l\pi + \eta \quad (l = 1, 2, 3, \dots) \quad (14)$$

unde η este o constantă astfel încât părțile reale și imaginare să aibă exact $4lN+M$ rădăcini, cu N și M ordinele polinoamelor de la numărătorul și numitorul părții reale. În domeniul calcului fracționar, teorema Pontryagin impune ca δ_r^* și δ_i^* să aibă exact $4l([N]+1)+[M]+1$ rădăcini.

Metoda bazată pe teoremele Pontryagin și Hermite-Biehler este aplicată unui proces de ordinul I cu timp mort în (Hafsi et al., 2013) pentru determinarea parametrilor unui regulator PI fracționar, iar (Sadalla et al., 2017) utilizează aceeași metodă aplicată unui proces de ordinul II cu timp mort.

Tehnica de autoacordare a reguletoarelor fracționare este exemplificată și în cazul proceselor cu timp mort, dar studiile și rezultatele publicate la ora actuală sunt limitate. Tehnica de autoacordare este utilă în cazul în care nu este cunoscut modelul matematic al procesului, iar natura procesului permite efectuarea unor teste experimentale pentru a analiza comportamentul acestuia la anumite semnale de intrare, ex. semnal sinus de o anumită amplitudine și frecvență. Un studiu recent despre autoacordarea proceselor cu timp mort este publicat de (Yu'ce et al., 2016), unde este determinat un regulator fracționar PI. Metoda de autoacordare este testată pe procese cu valori mari ale timpului mort. Un test simplu cu releu este utilizat pentru a determina frecvența procesului, apoi este determinat un regulator PI de ordin întreg folosind regulile Ziegler-Nichols. Regulatorul obținut este extins în domeniul fracționar prin încercări multiple, până când se obțin valori satisfăcătoare ale răspunsului procesului în buclă închisă.

O altă procedură bazată pe testul cu releu este prezentată în (Monje et al., 2008), unde procedura de acordare a unui PID fracționar este divizată în două părți: acordarea unui regulator PI fracționar urmată de acordarea unui regulator PD fracționar cu filtru. În ambele proceduri de

acordare se utilizează specificațiile de design frecvențiale: robustețea, marginea de fază și frecvența de tăiere. O procedură iterativă bazată pe testul releului este utilizată pentru a determina amplificarea și faza la frecvența la care diagrama Bode de fază este o linie dreaptă. Cu toate că autoacordarea este o metodă practică, autorii validează procedura doar prin simulări numerice.

(De Keyser et al., 2016) prezintă aceleași trei specificații frecvențiale pentru autoacordarea reguletoarelor PI/PD fracționare. Un test sinus este utilizat pentru a determina modulul, faza și panta graficului de fază la frecvența de tăiere. Apoi, se pot utiliza metode grafice sau tehnici de optimizare pentru a rezolva sistemul neliniar de ecuații. O metodă similară, este prezentată de (De Keyser et al., 2018), denumită FO-KC autotuner. Avantajul acestei metode constă în eliminarea sistemului neliniar de ecuații pentru determinarea parametrilor. Algoritmul de acordare se bazează pe marginea de fază pentru a defini o regiune nepermisă pe diagrama Nyquist care trebuie evitată de răspunsul frecvențial. Robustețea este asigurată prin determinarea reguletoarelor PI/PD fracționare astfel încât diferența între panta graficului frecvențial și panta regiunii nepermise să fie minimă la frecvența de tăiere.

(Caponetto et al., 2013) prezintă o metodă de autoacordare limitată la procese cu timp mort și ordin mai mare decât unu. Mai întâi este identificat procesul la o frecvență de tăiere dorită. Apoi, parametrii reguletorului PID fracționar sunt determinați prin rezolvarea sistemului format din cele trei ecuații în domeniul frecvențial.

Problema controlului aplicat proceselor cu timp mort poate fi rezolvată prin combinarea diverselor tipuri de reguletoare fracționare cu structuri clasice sau avansate Smith-Predictor, Fig. 2.

Acordarea reguletoarelor utilizate în structura Smith-Predictor prezentată în Fig. 2 poate fi realizată prin orice metodă prezentată anterior. Asemenea exemple sunt prezentate în literatura de specialitate de (Vu and Lee, 2014; Pop et al., 2012; Safaei and Tavakoli, 2018) prin acordarea reguletoarelor PI fracționare, (Shah and Agashe, 2017) prin încorporarea unui reguletor PID fracționar, etc.

Compensarea proceselor cu valori mari ale timpului mort este propusă de (Bhamre and Kadu, 2016). Toolbox-ul FOMCON pentru MatLAB/Simulink este utilizat pentru a determina un reguletor PID fracționar pentru un sistem de rezervoare cuplate. Procedura de acordare este

bazată pe tehnici iterative de optimizare.

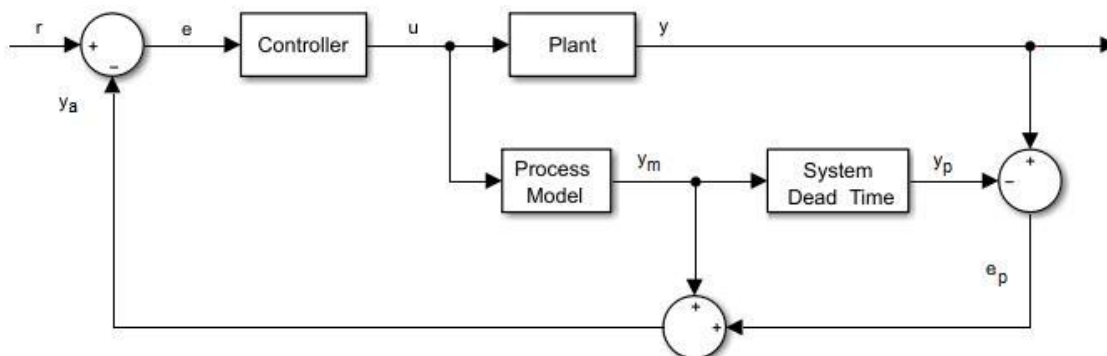


Figura 2. Structura de control Smith – Predictor pentru procese cu timp mort

Studiul prezentat de (Jesus and Machado, 2011) detaliază și compară integrarea a diverse metode de acordare în structura Smith Predictor. Un sistem de difuzare a căldurii este ales ca studiu de caz, iar algoritmi pentru acordarea reguletoarelor sunt exemplificați pe acesta.

Alte tehnici avansate de control se regăsesc în literatură pentru controlul proceselor cu timp mort care constau în combinarea a două sau mai multor strategii prezentate anterior. Punctul comun al acestor strategii avansate de control este regulatorul PID fracționar sau variațiuni ale acestuia. Printre tehnicile avansate se numără Sliding Mode Control (SMC), structuri de tip cascadă, reguletoare H_2 sau H_∞ sau Wavelet Kernel Neural Networks.

(Yousefi and Binazadeh, 2018) prezintă o abordare bazată pe strategia SMC care asigură stabilitatea sistemului complet independentă de timpul mort. Pentru faza de Sliding, este garantată stabilitatea asimptotică independentă de timpul mort, ca apoi timpul finit să asigure faza de Reaching.

Structuri de tipul controlului în cascadă sunt exemplificate de (Binazadeh and Yousefi, 2017). Ambele reguletoare din bucla rapidă și din bucla lentă sunt de ordin fracționar. Pentru bucla internă s-a acordat un regulator fracționar PD, iar pentru bucla master s-a utilizat structura avansată SMC. (Bettayeb et. al., 2016) combină funcția de transfer Bode ideală și principii SMC pentru a dezvolta un regulator fracționar dedicat robusteții la incertitudini ale procesului. Simulările numerice demonstrează veridicitatea metodei în cazul proceselor cu valori mari ale

timpului mort. O altă combinație de control este realizată în (Viveiros et al., 2014) unde o structură ierarhică este combinată cu un regulator fracționar PI aplicat pe o turbină de vânt.

Control WSAN pentru procese cu timp mort variabil este studiat de (Moghaddam et al., 2011) și (Tejado et al., 2011). Strategii fracționare de *gain scheduling* sunt dezvoltate pentru a compensa efectul variațiilor. O platformă experimentală este controlată prin internet cu scopul de a elimina timpul mort cauzat de comunicația în rețea.

Referințe:

1. Bhambhani, V., Chen, Y., Xue, D., 2008. Optimal Fractional Order Proportional Integral Controller for Varying Time-Delay Systems. IFAC Proceedings Volumes 41, 4910–4915.
2. Bhamre, P.K., Kadu, C.B., 2016. Design of a smith predictor based fractional order PID controller for a coupled tank system, in: 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICAC- DOT), pp. 705–708. doi:10.1109/ICACDOT.2016.7877678.
3. Bhaskaran, T., Chen, Y., Xue, D., 2007. Practical tuning of fractional order proportional and integral controller (i): Tuning rule development, in: ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers. pp. 1245–1258.
4. T., Binazadeh, M., Yousefi., 2017. Designing a Cascade-Control Structure Using Fractional- Order Controllers: Time-Delay Fractional-Order Proportional-Derivative Controller and Fractional-Order Sliding-Mode Controller. Journal of Engineering Mechanics 143, 4017037. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001234](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001234), doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001234.
5. Birs, I., Muresan, C., Nascu, I., Folea, S., Ionescu, C., 2018. Experimental results of fractional order PI controller designed for second order plus dead time (SOPDT) processes, in: The 15 th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2018), Singapore, November 18- 21, 2018.
6. Bozorg, M., Davison, E.J., 2006. Control of time delay processes with uncertain delays: Time delay stability margins. Journal of Process Control 16, 403–408. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2005.06.012>.
7. Caponetto, R., Dongola, G., Pappalardo, F., Tomasello, V., 2013. Auto-Tuning and Fractional Order Controller Implementation on Hardware in the Loop System. Journal of Optimization Theory and Applications 156, 141– 152. doi:10.1007/s10957-012-0235-y.
8. Chen, Y., Bhaskaran, T., Xue, D., 2008. Practical Tuning Rule Development for Fractional Order Proportional and Integral Controllers. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics 3, 21403–21408. URL: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2833934>.
9. Cheng, Y., Hwang, C., 2006. Stabilization of unstable first order time delay systems using fractional order PD controllers. Journal of the Chinese Institute of Engineers 29, 241–249. URL: <https://doi.org/10.1080/02533839.2006.9671121>.
10. Das, S., Das, S., Gupta, A., 2011. Fractional Order Modeling of a PHWR Under Step-Back Condition and Control of Its Global Power With a Robust $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller. IEEE Transactions on Nuclear Science 58, 2431–2441. doi:10.1109/TNS.2011.2164422.
11. Debbarma, S., Saikia, L.C., Sinha, N., 2014. Automatic generation control using two degree of freedom fractional order PID controller. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 58, 120–129. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206151400012X>,

doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.01.011>.

12. Gharab, S., Hafsi, S., Laabidi, K., 2017. Synthesis of PI fractional controller for fractional systems with time delay, in: 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), pp. 887–891. doi:[10.1109/CoDIT.2017.8102708](https://doi.org/10.1109/CoDIT.2017.8102708).
13. Gopinath, R., 2013. Article: Design of Fractional Order Controllers for First Order Plus Time Delay Systems. IJCA Proceedings on International Conference on Innovations In Intelligent Instrumentation, Optimization and Electrical Sciences ICIIIOES, 29–33.
14. Gude, J.J., Kahoraho, E., 2009. Simple tuning rules for fractional PI controllers, in: 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation, pp. 1–8. doi:[10.1109/ETFA.2009.5347157](https://doi.org/10.1109/ETFA.2009.5347157).
15. Hafsi, S., Farkh, R., Laabidi, K., 2014. Robust fractional controller for interval first order system with time delay. International Journal of Automation and Control 8, 339–361. URL: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJAAC.2014.065450>, doi:[10.1504/IJAAC.2014.065450](https://doi.org/10.1504/IJAAC.2014.065450).
16. Hafsi, S., Laabidi, K., Farkh, R., 2013. Synthesis of a fractional PI controller for a first-order time delay system. Transactions of the Institute of Measurement and Control 35, 997–1007. URL: <https://doi.org/10.1177/0142331212474018>, doi:[10.1177/0142331212474018](https://doi.org/10.1177/0142331212474018).
17. Hamamci, S.E., 2007. An Algorithm for Stabilization of Fractional-Order Time Delay Systems Using Fractional-Order PID Controllers. IEEE Transactions on Automatic Control 52, 1964–1969. doi:[10.1109/TAC.2007.906243](https://doi.org/10.1109/TAC.2007.906243).
18. Hamamci, S.E., Koksall, M., 2010. Calculation of all stabilizing fractional- order PD controllers for integrating time delay systems. Computers & Mathematics with Applications 59, 1621–1629. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122109005380>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.08.049>.
19. Hamidian, H., Jalali, A.A., 2011. Calculation of PID Controller Parameters for Unstable First Order Time Delay Systems.
20. Hmed, A.B., Amairi, M., Aoun, M., Hamdi, S.E., 2017. Comparative study of some fractional PI controllers for first order plus time delay systems, in: 2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pp. 278–283. doi:[10.1109/STA.2017.8314971](https://doi.org/10.1109/STA.2017.8314971).
21. Jesus, I.S., Machado, J.T., 2011. Fractional Control With a Smith Predictor. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics 6, 31010–31014. URL: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4002834>.
22. Keyser, R.D., Muresan, C.I., Ionescu, C.M., 2016. A novel auto- tuning method for fractional order PI/PD controllers. ISA Transactions 62, 268–275. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057816000392>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.01.021>.
23. Keyser, R.D., Muresan, C.I., Ionescu, C.M., 2018. Autotuning of a Robust Fractional Order PID Controller, in: Preprints, Joint 9th IFAC Symposium on Robust Control Design and 2nd IFAC Workshop on Linear Parameter Varying Systems Florianopolis, Brazil, September 3-5, pp. 656–661.
24. Luo, Y., Chen, Y., 2012. Stabilizing and robust fractional order PI controller synthesis for first order plus time delay systems. Automatica 48, 2159–2167. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109812002452>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.05.072>.
25. Malek, H., Luo, Y., Chen, Y., 2013. Identification and tuning fractional order proportional integral controllers for time delayed systems with a fractional pole. Mechatronics 23, 746–754. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415813000299>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.02.005>.
26. Merrikh-Bayat, F., 2018. General rules for optimal tuning the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers with application to first-

- order plus time delay processes. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 90, 1400–1410. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.21643>, doi:10.1002/cjce.21643.
27. Moghaddam, V.R., Bigdeli, N., Afshar, K., 2011. Tuning a Fractional Order PID Controller with Lead Compensator in Frequency Domain.
 28. Monje, C.A., Chen, Y., Vinagre, B.M., Xue, D., Feliu-Batlle, V., 2010. Fundamentals of Fractional-order Systems, in: *Fractional-order Systems and Controls Fundamentals and Applications*.
 29. Monje, C.A., Vinagre, B.M., Feliu, V., Chen, Y., 2008. Tuning and auto-tuning of fractional order controllers for industry applications. *Control Engineering Practice* 16, 798–812. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066107001566>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.08.006>.
 30. Padula, F., Visioli, A., 2011. Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers. *Journal of Process Control* 21, 69–81. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152410001927>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.10.006>.
 31. Pop, C.I., Ionescu, C., De Keyser, R., Dulf, E.H., 2012. Robustness evaluation of fractional order control for varying time delay processes. *Signal, Image and Video Processing* 6, 453–461. URL: <https://doi.org/10.1007/s11760-012-0322-4>, doi:10.1007/s11760-012-0322-4.
 32. Prasad, C.C., Krishnaswamy, P.R., 1975. Control of pure time delay processes. *Chemical Engineering Science* 30, 207–215. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0009250975800078>, doi:[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(75\)80007-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(75)80007-8).
 33. Ruszewski, A., Sobolewski, A., 2012. Comparative studies of control systems with fractional controllers. *Przegląd Elektrotechniczny* 88.
 34. Sadalla, T., Horla, D., Giernacki, W., Kozierski, P., 2017. Influence of time delay on fractional-order PI-controlled system for a second-order oscillatory plant model with time delay.
 35. Sadati, S., Ranjbar, A., Ghaderi, R., 2012. Fractional-Order Control of a Nonlinear Time-Delay System: Case Study in Oxygen Regulation in the Heart-Lung Machine. volume 2012. doi:10.1155/2012/478346.
 36. Safaei, M., Tavakoli, S., 2018. Smith predictor based fractional-order control design for time-delay integer-order systems. *International Journal of Dynamics and Control* 6, 179–187. URL: <https://doi.org/10.1007/s40435-017-0312-z>, doi:10.1007/s40435-017-0312-z.
 37. Sahu, R.K., Panda, S., Rout, U.K., 2013. DE optimized parallel 2-DOF PID controller for load frequency control of power system with governor dead-band nonlinearity. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 49, 19–33. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061513000173>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.12.009>.
 38. Shah, P., Agashe, S., 2017. Design of Controller for a Higher Order System Without Using Model Reduction Methods. *Progress in Fractional Differentiation and Applications* 3, 289–304. doi:10.18576/pfda/030405.
 39. Shekher, V., Rai, P., Rai, D.J., Singh, A., 2011. A Novel Evolutionary Tuning Method For Fractional Order Controller Of First Order Plus Time Delay System, in: *National Electrical Engineering Conference (NEEC-2011)*, At Delhi Technological University.
 40. Tang, W., Shi, S.j., Wang, M.x., 2002. Autotuning PID Control for Large Time-Delay Processes and Its Application to Paper Basis Weight Control. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 41, 4318–4327, doi:10.1021/ie0105324.
 41. Tejado, I., Vinagre, B., Chen, Y., 2011. Fractional Gain Scheduled Controller for a Networked Smart Wheel. *Experimental Results* , 15043–15048 doi:10.3182/20110828-6-IT-1002.01094.
 42. Valerio, D., da Costa, J.S., 2010. A review of tuning methods for fractional PIDs, in: *4th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications, FDA*.

43. Vinopraba, T., Sivakumaran, N., Selvaganesan, N., Narayanan, S., 2010. Stabilization Using Fractional-Order PID α Controllers for First Order Time Delay System, in: Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, International Conference on(ACT), pp. 725–728.
44. Viveiros, C., Melício, R., Igreja, J.M., Mendes, V.M.F., 2014. Fractional order control on a wind turbine benchmark, in: 2014 18th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), pp. 76–81. doi:10.1109/ICSTCC.2014.6982394.
45. Vu, T.N.L., Lee, M., 2014. Smith predictor based fractional-order PI control for time-delay processes. Korean Journal of Chemical Engineering 31, 1321– 1329. doi:10.1007/ s11814-014-0076-5.
46. Watanabe, K., Nobuyama, E., Kojima, A., 1996. Recent advances in control of time delay systems - A tutorial review, in: Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2083-2089 vol.2. doi:10.1109/ CDC.1996.572898.
47. Xin, R.H., Wang, C.Y., Liu, X.L., Li, M.Q., Bai, D.Y., 2015. Robust Fractional Order Proportional Integral Control for Large Time-Delay System, in: Mechanical Engineering and Materials Science, Trans Tech Publications. pp. 1614–1619. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.716-717.1614.
48. Yousefi, M., Binazadeh, T., 2018. Delay-independent sliding mode control of time-delay linear fractional order systems. Transactions of the Institute of Measurement and Control 40, 1212–1222. doi:10.1177/0142331216678059.
49. Yuce, A., Tan, N., Atherton, D.P., 2016. Fractional Order PI Con- troller Design for Time Delay Systems. IFAC-PapersOnLine 49, 94–99. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316306991>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.487>.

Activitatea 1.3. Studiu și analiza celor mai noi concepte din domeniul reguletoarelor PID bazate pe evenimente

Este bine cunoscut faptul că în unele procese apariția unor erori de control sau a unor oscilații cu amplitudine mică a procesului în jurul valorii de referință sunt specificații de design ușor de îndeplinit de un regulator eficient, însă reducerea timpului în care are loc schimbul de informații între agenții care fac parte din bucla de control (senzori, reguletoare și actuator) este una dintre cele mai dificile sarcini. Pentru a realiza acest aspect, cea mai convenabilă soluție este folosirea eșantionării bazată pe evenimente. În ultimii ani, eșantionarea bazată pe evenimente a atras atenția unui număr ridicat de cercetători. Reducerea volumului de informații transmise este o soluție viabilă, mai ales în cazurile în care sunt prezente constrângeri pe rata de comunicare (de exemplu, când datele sunt interschimbate într-un sistem de control distribuit prin rețele wireless). În aceste situații, reducerea cantității de trafic în rețea este un factor cheie în asigurarea livrării unor date exacte, eliminând riscul de pierdere și întârzieri de timp stochastice. Acestor avantaje se adaugă și reducerea latențelor, fluctuațiile în timpii de întârziere și utilizarea redusă a CPU-ului. Una dintre paradigmele rețelelor de comunicații susține că o reducere a fluxului de informație este mereu binevenită, mai ales în cazurile în care rețeaua este una generică, precum

Internetul, unde canalul este împărțit de aplicații multiple. Pentru orice situație, un cadru în care are loc o reducere a cantității de date interschimbate este ideal pentru rețelele care comunică wireless, îndeosebi când se utilizează alimentare pe baterii, sau dispozitive cu putere computațională redusă. Pentru aceste cazuri, controlul bazat pe evenimente prelungește durata de viață a dispozitivelor proporțional cu reducerea fluxului de informații.

În viața de zi cu zi, un eveniment este ceva ce se întâmplă într-un moment unic de timp. Translatând acest concept în limbaj informatic, un eveniment este un incident care se petrece atunci când un Boolean sau o condiție logică devine adevărată. Un exemplu de condiție bazată pe evenimente generică poate fi reprezentată ca

$$(condiția logică este TRUE) SAU (t_{without} \geq t_{max})$$

Condiția logică detectează dacă ceva se întâmplă la un anumit moment de timp, considerând condiția ca fiind termenul asincron al aserțiunii. În vederea implementării legilor de control, condiția logică este alcătuită de operații logice, a căror valoare poate fi de tip Boolean, unde variabilele sunt semnalele pe care senzorii îi primește de la proces sau de la semnalul de comandă. Partea dreaptă a condiției este mereu o condiție de siguranță asincronă care forțează producerea evenimentului. Acest lucru este utilizat pentru situațiile în care condiția logică nu poate fi adevărată niciodată. Pentru acest caz, se adaugă o condiție adițională referitoare la timpul scurs fără producerea niciunui eveniment. De asemenea, pot apărea cazuri unde este necesară introducerea unei condiții secundare sincrone care garantează un timp minim între evenimente. Aceasta poate fi scrisă ca

$$((condiția logică este TRUE) \text{ ȘI } (t_{without} \geq t_{min})) SAU (t_{without} \geq t_{max})$$

Condiția sincronă evită declanșarea unui număr infinit de evenimente într-un interval de timp finit, notat cu t_{min} . Un exemplu grafic este prezentat de Fig. 3.

În Fig. 3, E reprezintă evenimente declanșate datorită condițiilor logice asincrone care devin adevărate la anumite instanțe de timp. T reprezintă evenimentele forțate atunci când timpul scurs depășește timpul maxim acceptat între declanșarea a doua evenimente. F reprezintă o situație unde condiția logică devine adevărată, dar timpul scurs de la ultimul eveniment este mai mic decât timpul minim.

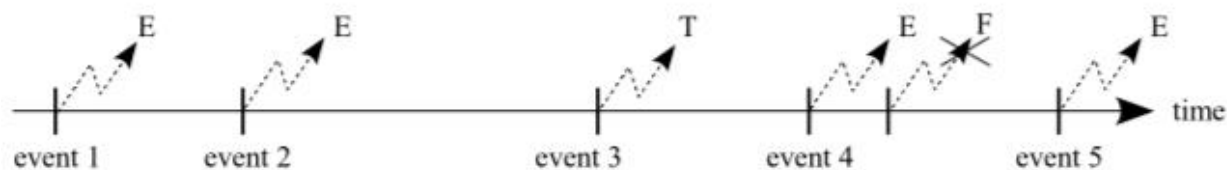


Figure 3. Schemă pentru acțiuni bazate pe evenimente

Procesul de generare a unui semnal discret prin evaluarea unei condiții bazată pe evenimente este întâlnită în literatură sub denumirea de eșantionare bazată pe evenimente. Alte denumiri pot fi întâlnite precum eșantionare cu frecvență variabilă (Dorf, 1962), eșantionare adaptivă (Mitchell, 1969), eșantionare dead-band (Otanez, 2002), eșantionare Lebesgue (Astrom, 2002), eșantionare send-on-delta (Miskowicz, 2006) sau eșantionare level-crossing (Miskowicz, 2005). Studii din anii 1970 abordează strategiile de eșantionare bazate pe evenimente în (Gupta, 1963), (Hsia, 1974). Studiile analitice recente asupra superiorității metodei send-on-delta comparată cu eșantionarea bazată pe timp și a altor eșantionări bazate pe evenimente pot fi găsite în (Astrom, 2008; Miskowicz, 2005; Miskowicz, 2006; Miskowicz, 2007).

O structură de control bazată pe evenimente este prezentată în diagrama din Fig. 4.

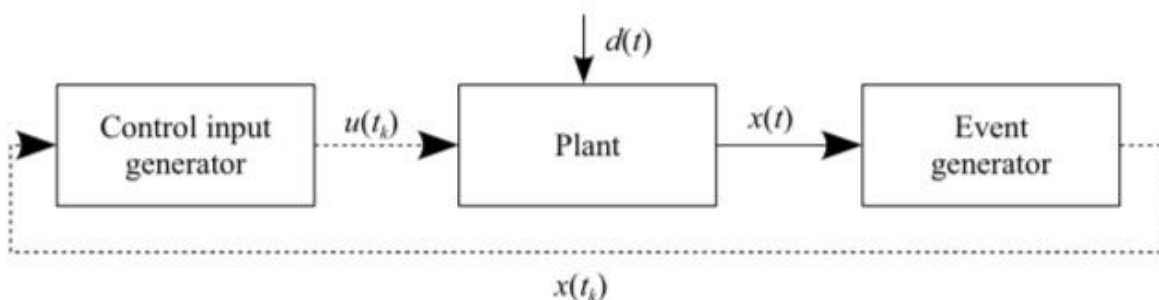


Figura 4. Diagrama structurii de control bazată pe evenimente

Sistemul constă într-un proces generic, un detector de evenimente și un generator de semnale de control (în care este inclus și un observator de stare). Detectorul de evenimente trimite date (legate de ieșirea procesului sau de vectorul de stare) pentru a activa semnalul de control la producerea unui eveniment. Generatorul de semnale de control este inactiv între două evenimente consecutive și este invocat doar de detectorul de evenimente. Așadar, generatorul de semnale de control de intrare funcționează în buclă închisă doar în cazul evenimentelor. În mod

similar, la producerea unei legi noi de control, există două condiții posibile care pot fi utilizate pentru a trimite date la actuator: atunci când acestea sunt disponibile sau când o condiție logică devine adevărată.

Condiția localizată în detectorul de evenimente și algoritmul de control inclus în generatorul de semnale de control clasifică strategiile de control bazat pe evenimente în trei categorii:

1. Control bazat pe feedback, semnalul de comandă este calculat atunci când o variabilă variază în afara limitelor impuse. Așadar, semnalul de control este calculat atunci când un parametru variază mai mult decât o valoare prestabilită, notată cu Δ . Generatorul de semnale de comandă calculează o comandă de fiecare dată când $x(t_k)$ trece prin valorile precalculate (... , -3Δ , -2Δ , $-\Delta$, 0 , Δ , 2Δ , 3Δ , ...). De cele mai multe ori legea de control este una de tip PID cu perioadă de eșantionare variabilă (Arzen, 1999; Chacon, 2010; Durand, 2009; Pawlowski, 2008; Rabi, 2008) sau lege PID bazată pe feedback (Heemels, 2008; Henningsson, 2009; Kofman, 2006; Marchand, 2008).
2. Valoarea semnalului de comandă este setată la maxim, respectiv minim pentru perioada de timp în care $x(t)$ este în afara unui interval prestabilit în jurul referinței y_{sp} sau o traiectorie a stărilor X_s . Atunci când $x(t)$ reintră în banda acceptată, este declanșat un nou eveniment, iar generatorul produce un control de tip feedforward pentru a duce ieșirea procesului la valoarea de referință sau pe traiectoria dorită (Astromg, 2008; Cervin, 2007; Lehmann, 2011; Lunze, 2010).
3. O acțiune de tip impuls este generată pentru a aduce procesul la referința dorită sau la punctul inițial atunci când x trece limitele prestabilite. În restul timpului, acțiunea de comandă este 0 (Astrom, 2002; Cervin, 2008; Henningson, 2008; Rabi, 2008).

(Årzén, 1999) a dezvoltat un regulator PID bazat pe evenimente pentru a reduce timpul de procesare CPU pentru calculul semnalului de comandă. Regulatorul este o aproximare hibridă între un regulator PID bazat pe timp sau unul bazat pe evenimente. Activarea generatorului de evenimente este bazată pe timp cu o perioadă h_{nom} , pe când invocarea buclei de control este bazată pe producerea unui eveniment. Dacă frecvența de activare a generatorului este

crescută la maxim, regulatorul devine exclusiv un PID bazat pe evenimente. Regulatorul PID bazat pe evenimente poate fi utilizat cu succes în arhitecturi de tip client-server.

Din punct de vedere al funcționării, la fiecare frecvență nominală h_{nom} , regulatorul citește valoarea senzorului, iar detectorul de evenimente evaluează condiția de declanșare a evenimentului. La îndeplinirea condiției, este declanșat evenimentul, iar generatorul de semnale de comandă calculează valoarea necesară comenzii utilizând o lege de reglare PID cu perioadă de eșantionare variabilă. Condiția logică este o funcție a erorii relative. Așadar, condiția este adevărată atunci când valoarea absolută a diferenței între valoarea curentă a erorii de control la momentul actual $e(t_{act})$ și valoarea ultimului eveniment este mai mare decât o valoare prestabilită, notată cu Δ_e . De asemenea, detectorul de evenimente include o condiție de siguranță bazată pe timp cu scopul de a garanta un interval de timp maxim între două evenimente consecutive, h_{max} . Condiția generală a controlului bazat pe evenimente poate fi scrisă ca

$$(|e(t_{act}) - e(t_{last})| \geq \Delta_e)SAU(h_{act} \geq h_{max}) \quad (14)$$

Un exemplu de schimb de informații între senzori, detectorul de evenimente și generatorul de semnale de comandă într-o structură de control PID bazată pe evenimente unde $h_{max} = 5h_{nom}$ este prezentată în Figura 5. C reprezintă acțiunea de control și este calculată atunci când condiția logică devine adevărată, iar T reprezintă controlul generat datorită condițiilor de siguranță ($h_{act} \geq h_{max}$).

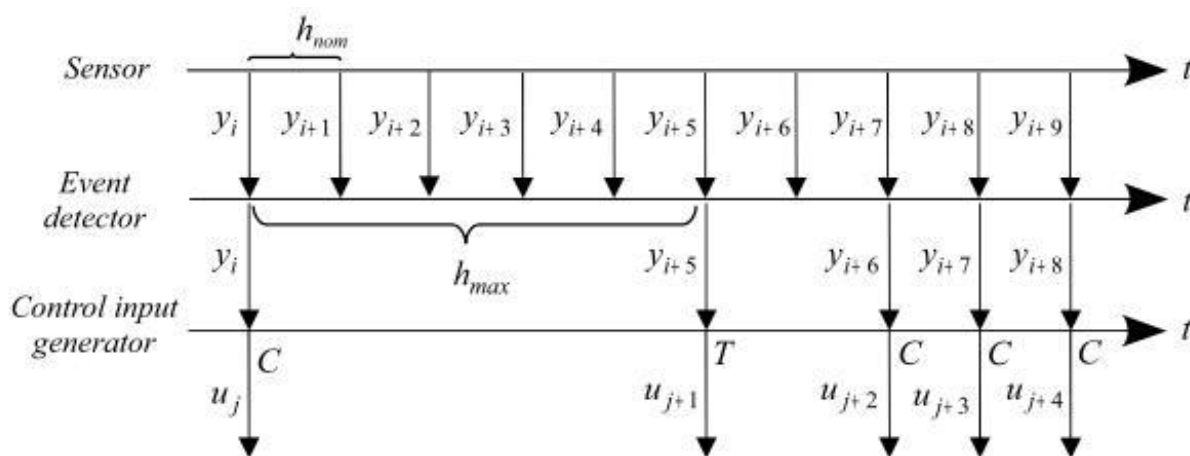


Figura 5. Exemplu de structură PID cu evenimente

(Rabi, 2008) propune o strategie care utilizează două detectoare de evenimente pentru a activa calculul semnalului de comandă în cazul în care se optează pentru un regulator de tip PI. În această abordare, primul detector de evenimente se bazează pe semnalul de eroare, iar al doilea analizează indicii de performanță IAE din ecuația (8). Se poate spune că există detectori de tip P și de tip I. Când unul dintre evenimente este declanșat, parametrii pentru recalcularea semnalului de comandă sunt trimiși la generatorul de comenzi.

Acțiunea proporțională este produsă în două situații: un eveniment este declanșat dacă semnalul de eroare a crescut cu o valoare Δ_p comparativ cu ultima valoare sau un eveniment este declanșat dacă valoarea semnalului de eroare scade de la ultima detecție, depășind valoarea originală cu Δ_p . Condiția completă de tip P care combină ambele situații este

$$(|e(t_{act}) - e(t_{last})| \geq \Delta_p) \text{ SAU } (|e(t_{act}) - e(t_{last})| < 0 \text{ ȘI } |e(t_{act})| \geq \Delta_p) \quad (15)$$

Motivația de a introduce două tipuri de evenimente este faptul că evenimentele de tip P individuale pot cauza erori staționare. Pentru a elimina această problemă, se introduc condițiile logice bazate pe integrale. Un eveniment de tip I este declanșat când indexul IAE din (8) își schimbă valoarea cu mai mult de Δ_I de la ultima detecție.

$$\left| \int_{t_{last}}^{t_{act}} e(t) dt \right| \geq \Delta_I \quad (16)$$

Timpul t_{last} devine t_{act} la declanșarea unui nou eveniment, indiferent de tipul acestuia. La fiecare apariție a evenimentelor de tip I sau P, generatorul de semnale de comandă produce o reactualizare a termenilor $t_{last} = t_{act}$. Între două evenimente consecutive, semnalul de comandă este definit ca o superpoziție a două semnale simple, o serie de pulsuri cu amplitudine proporțională cu eroarea și un waveform constantă pe porțiuni depinzând de eșantioanele integralei semnalului de eroare.

$$u(t_{act}) = \begin{cases} -K_p e(t_{last}) - K_i \int_{t_{last}}^{t_{act}} e(t) dt, & t_{act} \leq t_{last} + \varepsilon(K_p, K_i) \\ -K_i \int_{t_{last}}^{t_{act}} e(t) dt, & t_{act} > t_{last} + \varepsilon(K_p, K_i) \end{cases} \quad (17)$$

unde $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, iar $\varepsilon(K_p, K_i)$ este durata unui puls care determină partea proporțională, pe când partea integratoare este aplicată pe toată durata intervalului de eșantionare.

(Sánchez, 2011) propune o nouă strategie de PID bazat pe evenimente pe o structura cu 2 grade de libertate pentru a urmări referința dată și pentru rejectarea perturbațiilor. Schema bloc a regulatorului este prezentată în Fig. 6.

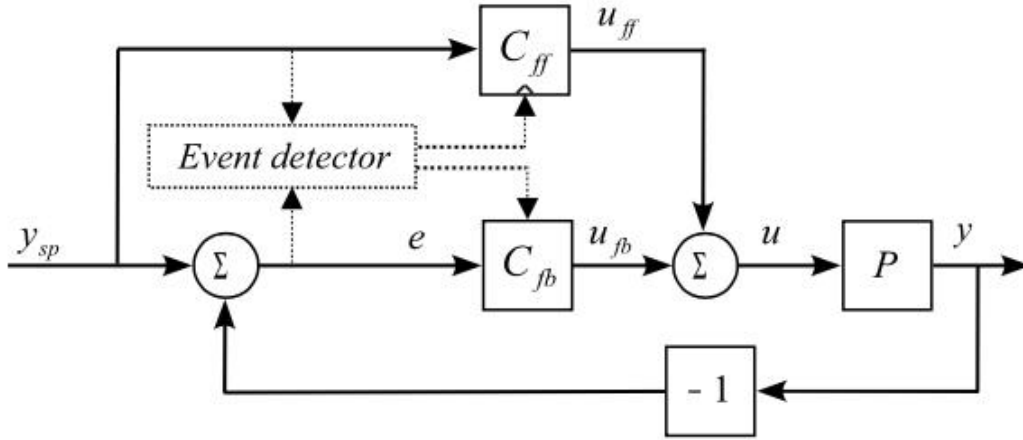


Figura 6. Schema bloc a regulatorului PID cu 2 grade de libertate

Logica de detecție a ambelor regulatoare este localizată într-un singur bloc. În acest caz, generarea acțiunilor de control u_{ff} și u_{fb} de compensatoarele C_{ff} și C_{fb} este declanșată de evenimente de stare obținute din valorile referinței și a semnalului de control.

Pentru urmărirea cu succes a referinței, soluția este o strategie de acordare care consideră o funcție de transfer de ordinul I cu timp mort și un regulator în buclă deschisă care produce un regulator bazat pe evenimente de tip feedforward C_{ff} , acesta producând o tranziție a variabilelor procesului prin două evenimente. După ce procesul ajunge în regim staționar, un regulat PI bazat pe evenimente C_{fb} rejectează perturbațiile și menține semnalul de ieșire în jurul valorii y_{sp} . Regulatorul C_{fb} calculează acțiunile proporționale și integratoare doar când semnalul de ieșire iese din banda admisă. Procesul de ordinul I cu timp mort poate fi modelat ca:

$$P(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-LS} \quad (18)$$

Semnalul de ieșire a procesului care tranzitează $(0, y_{sp})$ poate fi obținut prin aplicarea următorului semnal de control în buclă deschisă.

$$u_{ff}(t) = \begin{cases} \overline{u_{ff}}, & t < \tau \\ \frac{y_{sp}}{K}, & t \geq \tau \end{cases} \quad (19)$$

unde valoarea lui $\overline{u_{ff}}$ este determinată astfel încât ieșirea procesului y (care este 0 până la momentul $t=L$) este y_{sp} la momentul $t=\tau+L$.

$$\overline{u_{ff}} = \frac{y_{sp}/K}{1-e^{-\tau/T}} \quad (20)$$

Semnalul de ieșire corespunzător poate fi notat ca:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < L \\ \overline{u_{ff}}K \left(1 - e^{-\frac{t-L}{T}}\right), & L \leq t \leq L + \tau \\ y_{sp}, & t > L + \tau \end{cases} \quad (21)$$

Este important de menționat faptul că valoarea $\overline{u_{ff}}$ din ecuația (20) trebuie menținută constantă pentru un interval de timp:

$$\tau = -T \log\left(1 - \frac{y_{sp}}{K\overline{u_{ff}}}\right) \quad (22)$$

pentru obținerea tranziției dorite din ecuația (19).

Fie un regulator proporțional bazat pe evenimente cu feedback:

$$C_{ff}(s) = K_p^{ff} \quad (23)$$

unde K_p^{ff} este ales astfel încât să producă un comportament similar cu acțiunea în buclă deschisă din ecuația (19). Pentru acest scop, se consideră acțiunea la momentul $t=0$ ca fiind

$$u(0) = K_p^{ff} e(0) = K_p^{ff} y_{sp} \quad (24)$$

Înlocuind (24) în (22) se obține acțiunea de control care trebuie menținută constantă pentru intervalul de timp:

$$\tau = -T \log \left(1 - \frac{y_{sp}}{KK_p^{ff} y_{sp}} \right) = -T \log \left(1 - \frac{1}{KK_p^{ff}} \right) \quad (25)$$

Pentru ca acțiunea proporțională să ofere un comportament similar cu cel în buclă deschisă, semnalul de control trebuie să treacă la valoarea de regim staționar la momentul de timp $t = \tau$:

$$u_\tau = \frac{y_{sp}}{K} \quad (26)$$

de unde rezultă:

$$K_p^{ff} (y_{sp} - y_\tau) = \frac{y_{sp}}{K} \quad (27)$$

care poate fi rescrisă ca:

$$K_p [1 - KK_p^{ff} (1 - e^{-\frac{\tau-L}{T}})] = \frac{1}{K} \quad (28)$$

Din (28) rezultă:

$$\tau = L - T \log \left(\frac{(KK_p^{ff})^2 - KK_p^{ff} + 1}{(KK_p^{ff})^2} \right) \quad (29)$$

Valoarea lui KK_p^{ff} poate fi determinată prin egalarea ecuațiilor (29) cu (25), de unde se obține:

$$-T \log \left(1 - \frac{1}{KK_p^{ff}} \right) = L - T \log \left(\frac{(KK_p^{ff})^2 - KK_p^{ff} + 1}{(KK_p^{ff})^2} \right) \quad (30)$$

Substituind KK_p^{ff} cu X se obține următoarea ecuație de ordinul II:

$$X^2 \left(1 - e^{-\frac{L}{T}} \right) - X \left(1 - e^{-\frac{L}{T}} \right) + 1 = 0 \quad (31)$$

Din (31) se obține valoarea lui K_p^{ff} , iar τ și y_τ se obțin din (25), respectiv (26).

Pentru rejectarea perturbației, se definește un interval în jurul valorii de referință ținând cont de specificațiile impuse pentru proces:

$$y_{ll} \leq y_{sp} \leq y_{ul} \quad (32)$$

Părțile proporționale și integratoare ale regulatorului sunt activate doar când valoarea de ieșire ajunge în intervalul stabilit în (32) și acestea încep să calculeze valori de comandă doar când ieșirea iese din interval datorită unei perturbații. Soluția bazată pe evenimente constă în aplicarea unei strategii de eșantionare pentru a activa calculul acțiunii de control. Acțiunea proporțională este calculată atunci când condiția din (33) este îndeplinită:

$$|e(t_{act}) - e(t_{last})| \geq \Delta_p \quad (33)$$

Acțiunea integratoare este calculată la îndeplinirea condiției:

$$\left| \int_{t_{last}}^{t_{act}} e(t) dt \right| = |IE(t_{act}) - IE(t_{last})| \geq \Delta_I \quad (34)$$

Pentru demonstrarea conceptului prezentat anterior se acordează un regulator PI pentru un proces de ordinul I cu timp mort:

$$P(s) = \frac{2}{3s+1} e^{-2s} \quad (35)$$

Pentru proces, se proiectează un regulator de ordin întreg:

$$H_{pi}(s) = 0.2582 \frac{0.1107}{s} \quad (36)$$

cu parametrii $k_p = 0.2582$ și $T_i = 9.0351$. Răspunsul procesului (35) în buclă închisă cu regulatorul (36), implementare clasică, fără evenimente, este ilustrat în Fig. 7.

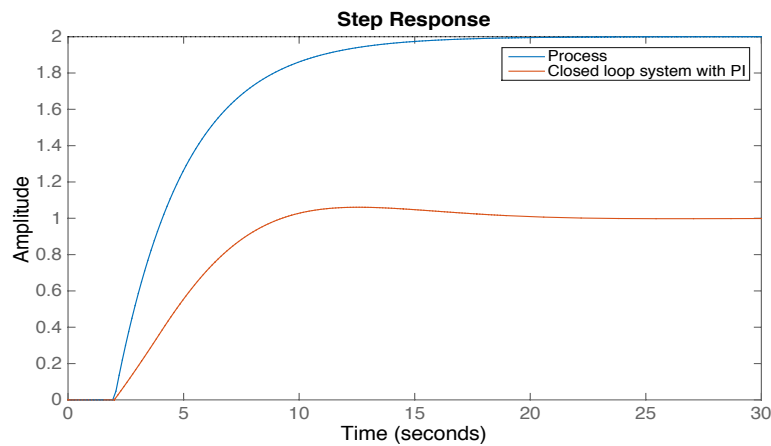


Figura 7. Comparație între procesul necompensat și procesul cu PI

Apoi, s-a realizat implementarea regulatorului sub formă de evenimente, utilizând schema Simulink din Fig. 8. Pentru implementarea Simulink, s-a folosit un bloc Matlab Function pentru a accesa o funcție predefinită sub formă de cod Matlab unde este implementată logica regulatorului bazat pe evenimente. A se observa că blocul de MatLAB function nu are intrare de referință, ci aceasta este dată în interiorul funcției MatLAB prin definirea intervalul din ecuația (32). Codul funcției MatLAB este prezentat mai jos.

```
function u = twoDegPI(y)
L = 2; T = 3; K = 1;
Kp = 0.25825; Ti = 1/0.11068;

global e_last IE ui up
yul = 1.5;
yll = 0.99;
Delta_P = 0.1;
Delta_I = 0.1;
hnom = 0.5;

if (y>yul)
    e=y-yul;
else if (y<yll)
    e=yll-y;
else e=0;
    e_last=0;
end
IE=IE+hnom*e;
% Detecting P-type events
if (abs(e-e_last)>Delta_P)
    up=Kp*e;
    e_last=e;
end
% Detecting I-type events
if (abs(IE)>Delta_I)
    ui=ui+Kp/Ti*IE;
    IE=0;
end
end
```

În schema Simulink din Fig. 8, se pot observa blocurile de Data Store. Acestea sunt utilizate pentru a salva valoarea valorilor globale între iterații. De asemenea, variabilele globale trebuie definite ca parametrii în blocul MatLAB function. Se alege $h_{nom}=0.5$ pentru realizarea simulării, iar rezultatul obținut prin implementarea regulatorului PI bazat pe evenimente este

prezentat în Fig. 9 pentru urmărirea referinței și în Fig. 10 pentru rejectarea perturbației introduse la momentul $t = 20$ secunde, cu o valoare de -0.2 (variație de 20% din valoarea referinței).

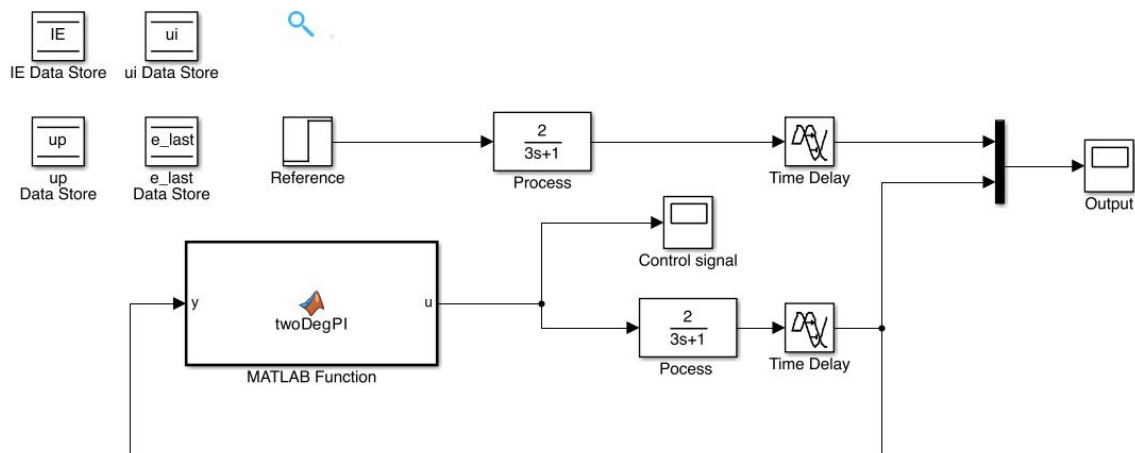


Figure 8. Schema Simulink de implementare a regulatorului PI bazat pe evenimente

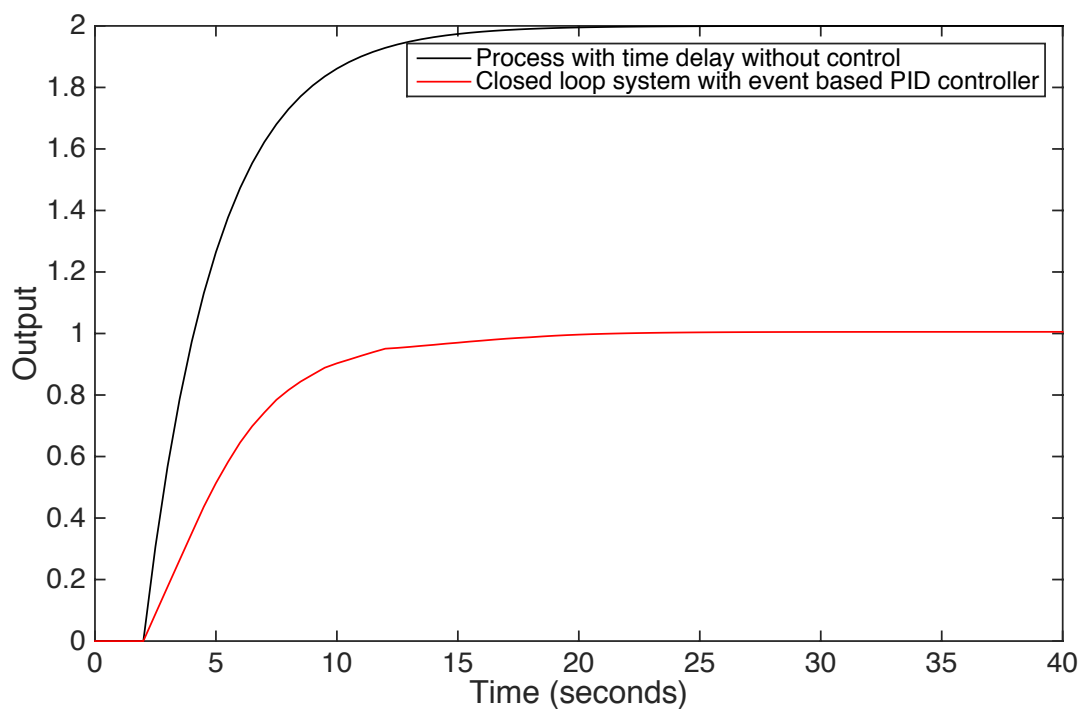


Figura 9. Comparație între procesul necompensat și procesul cu PI bazat pe evenimente – urmărirea referinței

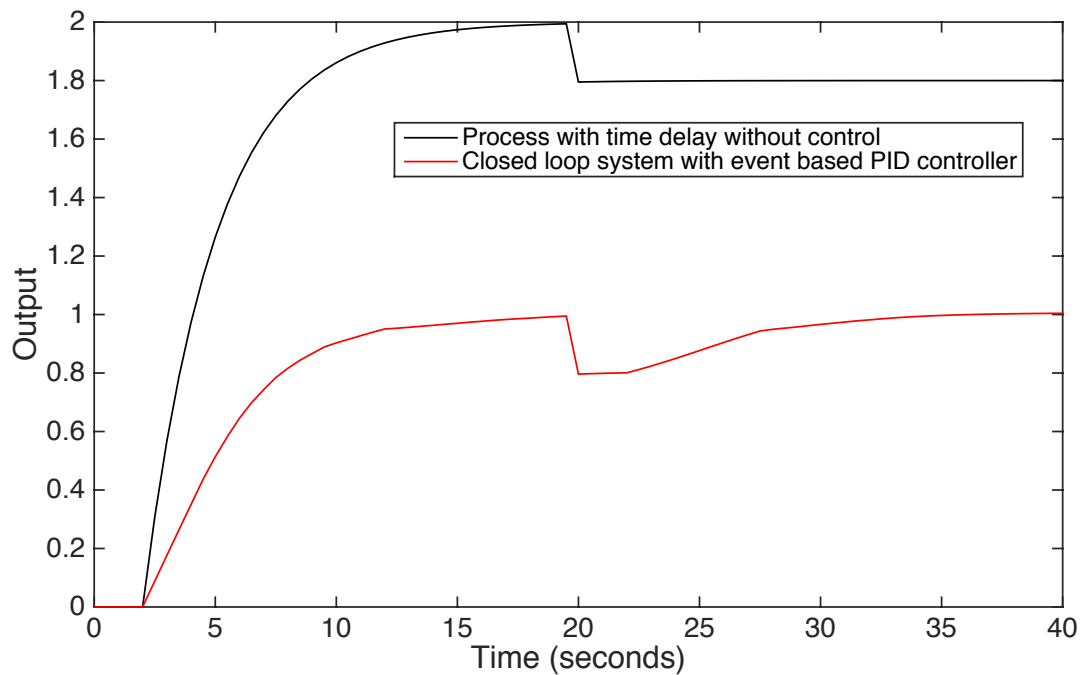


Figura 10. Comparație între procesul necompensat și procesul cu PI bazat pe evenimente – rejectarea perturbației de pe ieșire

1. Årzén, K.E.: A simple event-based PID controller. In: Proc. of the 14th World Congress of IFAC, Beijing, China (1999)
2. Åström, K.J., Bernhardsson, B.M.: Comparison of Riemann and Lebesgue sampling for first order stochastic systems. In: Proc. of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV, USA (2002)
3. Åström, K.J.: Event based control. In: Astolfi, A., Marconi, L. (eds.) Analysis and Design of Nonlinear Control Systems: In Honor of Alberto Isidori. Springer, Berlin (2008)
4. Åström, K.J., Bernhardsson, B.M.: Comparison of Riemann and Lebesgue sampling for first order stochastic systems. In: Proc. of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV, USA (2002)
5. Chacón, J., Sánchez, J., Dormido, S.: Experimental study of a pure event-based PI controller in a wireless control system. In: Proc. of the 9th Portuguese Conference on Automatic Control (CONTROLO'2010), Coimbra, Portugal (2010)
6. Cervin, A., Henningsson, T.: Scheduling of event-triggered controllers on a shared network. In: Proc. of the 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico (2008)

7. Dorf, R.C., Lember, M.C., Phillips, C.A.: Adaptive sampling frequency for sampled data control systems. *IRE Trans. Autom. Control* **7**(1), 38–47 (1962)
8. Durand, S., Marchand, N.: An event-based PID controller with low computational cost. In: *Proc. of the 8th International Conference on Sampling Theory and Applications (SampTA'09), Special Session on Sampling and Industrial Applications, Marseille, France (2009)*
9. Gupta, S.: Increasing the sampling efficiency for a control system. *IEEE Trans. Autom. Control* **8**(3), 263–264 (1963)
10. Heemels, W.P.M.H., Sandee, J.H., vanden Bosch, P.P.J.: Analysis of event-driven controllers for linear systems. *Int. J. Control* **81**(4), 571–590 (2008)
11. Henningsson, T., Cervin, A.: Comparison of LTI and event-based control for a moving cart with quantized position measurements. In: *Proc. of the 10th European Control Conference (ECC'09), Budapest, Hungary (2009)*
12. Henningsson, T., Johansson, E., Cervin, A.: Sporadic event-based control of first-order linear stochastic systems. *Automatica* **44**(11), 2890–2895 (2008)
13. Hsia, T.: Analytic design of adaptive sampling control law in sampled-data systems. *IEEE Trans. Autom. Control* **19**(1), 39–42 (1974)
14. Kofman, E., Braslavsky, J.: Level crossings sampling in feedback stabilization under data rate constraints. In: *Proc. 45th IEEE International Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA (2006)*
15. Lehmann, D., Lunze, J.: Extension and experimental evaluation of an event-based state-feedback approach. *Control Eng. Pract.* **19**(2), 101–112 (2011)
16. Lunze, J., Lehmann, D.: A state-feedback approach to event-based control. *Automatica* **46**(1), 211–215 (2010)
17. Marchand, N.: Stabilization of Lebesgue sampled systems with bounded controls: the chain of integrators case. In: *Proc. of the 17th World Congress of IFAC, Seoul, Korea (2008)*
18. Mitchell, J.R., McDaniel, W.L. Jr: Adaptive sampling technique. *IEEE Trans. Autom. Control* **A-11**, 200–201 (1969)
19. Miskowicz, M.: Sampling of signals in energy domain. In: *Proc. of the 10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA'05), Catania, Italy (2005)*
20. Miskowicz, M.: Sampling of signals in energy domain. In: *Proc. of the 10th IEEE Conference on Emerging Technology and Factory Automatization (EFTA'05), Catania, Italy (2005)*
21. Miskowicz, M.: Send-on-delta: An event-based data reporting strategy. *Sensors* **6**, 49–63 (2006)
22. Miskowicz, M.: Asymptotic effectiveness of the event-based sampling according to the integral criterion. *Sensors* **7**(1), 16–37 (2007)
23. Otanez, P., Moyne, J., Tilbury, D.: Using deadbands to reduce communication in networked control systems. In: *Proc. of the American Control Conference (ACC'2002), Anchorage, USA (2002)*

24. Pawlowski,A.,Guzmán,J.L.,Rodríguez,F.,Berenguel,M.,Sánchez,J.,Dormido,S.:Event- based control and wireless sensor network for greenhouse diurnal temperature control: A sim- ulated case study. In: Proc. of the 13th IEEE International Conference on Emerging Technolo- gies and Factory Automation (EFTA- 2008), Hamburg, Germany (2008)
25. Rabi, M., Johansson, K.H.: Event-triggered strategies for industrial control over wireless networks. In: Proc. of the 4th Annual International Conference on Wireless Internet, Maui, Hawaii, USA (2008)
26. Sánchez,J.,Visioli,A.,Dormido,S.:Atwo-degree-of-freedomPIcontrollerbasedonevents. J. Process Control (2011). doi:[10.1016/j.jprocont.2010.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.12.001)

Activitatea 1.4. Diseminarea rezultatelor

Toate activitățile menționate în planul de realizare pentru Etapa I, anul 2018, au fost realizate în proporție de 100%.

Rezultate estimate (menționate pentru anul 2018)	Rezultate realizate în anul 2018
• 2 lucrări acceptate în cadrul unor conferințe internaționale	• 3 lucrări prezentate și publicate în proceedings-urile unor conferințe indexate ISI (2 lucrări), respectiv în curs de indexare (1 lucrare) • 1 lucrare ISI publicată în revista Algorithms, recent indexata ISI • 3 lucrări aflate în recenzie la reviste ISI (factori de impact de 3.576, 2.787 și 1.225)
• mobilități de cercetare	• 1 mobilitate de cercetare

Lucrări publicate, în recenzie si în curs de publicare

1. Muresan, C.I., Copot, C., Birs, I.R., De Keyser, R., Vanlanduit, S., Ionescu, C. (2018), Experimental validation of a novel auto-tuning method for a fractional order PI controller

- on an UR10 robot, Algorithms, 11(7), pp. 95, DOI: 10.3390/a11070095 (**ISI JOURNAL**)
2. Muresan, C.I., Ionescu, C. (2018) Adaptive Robust Fractional Order Control of a Rendez-Vous Mechatronic Platform, Journal of the Franklin Institute, under review (**ISI JOURNAL, impact factor 3.576**)
 3. Birs, I.R., Muresan, C.I., Ionescu, C.M. (2018), A survey of recent advances in fractional order control for time delay systems, Journal of Process Control, under review (**ISI JOURNAL, impact factor 2.787**)
 4. Birs, I.R Muresan, C.I., Prodan, O.,Folea, S., (2018), An experimental tuning approach of fractional order controllers in the frequency domain, ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations, under review (**ISI JOURNAL, impact factor 1.225**)
 5. Birs, I.R., Muresan, C.I., Prodan, O., Folea, S.C., Ionescu, C.M. (2018), Structural vibration attenuation using a fractional order PD controller designed for a fractional order process, 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control PID 2018, IFAC-Papers Online, Vol. 51, no. 4, pp. 533-538, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.06.150 (**ISI PROCEEDINGS**)
 6. Muresan, C.I., De Keyser, R., Birs, I.R., Copot, D., Ionescu, C. (2018) Benchmark Challenge: a robust fractional order control autotuner for the Refrigeration Systems based on Vapor Compression, 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control PID 2018, IFAC-Papers Online, Vol. 51, no. 4, pp. 31-36, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.06.021 (**ISI PROCEEDINGS**)
 7. Birs, I.R Muresan, C.I., Folea, S., Prodan, O., Ionescu, C. (2018), Fractional order modeling and control of a carrier prototype for targeted drug delivery, Proceedings of The 2nd International Conference on Industrial Design Engineering (ICIDE 2018), ACM Digital Library, DOI: 10.1145/3290818.3290833, 21-23 September 2018, Phuket, Thailand (**ISI PROCEEDINGS**)

