

TRANSFORMAREA MODELELOR BAZATĂ PE RPODUS TENSORIAL UTILIZATĂ ÎN MODELAREA ȘI PROIECTAREA SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Ingineria Sistemelor

autor **ing. Elena-Lorena CONSTANTIN (căs. HEDREA)**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Radu-Emil PRECUP

iulie 2022

Teza de doctorat intitulată „**Transformarea modelelor bazată pe produs tensorial utilizată în modelarea și proiectarea sistemelor de reglare automată**” abordează domeniul de actualitate al aplicării tehnicii transformării modelelor bazată pe produs tensorial (Tensor Product – TP) în modelarea și proiectarea unor sisteme de reglare automată pentru trei procese complexe reprezentative: sisteme cu trei rezervoare amplasate pe verticală, sisteme cu levitație magnetică și sisteme de tip pendul invers. Teza este structurată în cinci capitole și patru anexe.

În **capitolul 1** este prezentată tematica abordată împreună cu motivația cercetării. Sunt specificate obiectivele tezei și este oferită o scurtă prezentare generală a acesteia.

Primul obiectiv al tezei este validarea algoritmului de modelare specific tehnicii transformării modelelor bazată pe TP în cazul celor trei procese complexe reprezentative. Modelele TP obținute sunt validate utilizând diverse scenarii de testare și sunt comparate cu alte modele liniare/liniarizate ale acelorași procese pentru a le evidenția performanțele.

Cel de-al doilea obiectiv al tezei este validarea algoritmului de reglare al tehnicii transformării modelelor bazată pe TP utilizând inegalități matriceale liniare (Linear Matrix Inequalities – LMIs) și tehnica de compensare distribuită paralelă (Parallel Distributed Compensation – PDC). Sunt proiectate structuri de reglare automată convențională și structuri de reglare automată în cascadă pentru reglarea celor trei procese complexe reprezentative.

În cadrul **capitolului 2** este realizată o descriere a ideii de bază a tehnicii transformării modelelor bazată pe TP. Este efectuat un studiu bibliografic care subliniază principalele contribuții teoretice și practice obținute în acest domeniu până în momentul de față. De asemenea, sunt prezentate principalele avantaje și dezavantaje ale tehnicii transformării modelelor bazată pe TP. Principalul avantaj al acestei tehnici este determinarea modelelor liniare invariante în timp (Linear Time Invariant – LTI) asupra cărora pot fi aplicate tehnicile inegalităților matriceale liniare. Principalul dezavantaj al acestei tehnici este reprezentat de dimensiunea mare a tensorului modelului TP și a tensorului regulatorului TP care pot conduce la utilizarea unei cantități mari de memorie, număr mare de calcule și timp mare de execuție.

Capitolul 3 este dedicat prezentării pașilor algoritmului de modelare și pentru determinarea modelelor TP pentru trei procese și anume sistemul cu trei rezervoare amplasate pe verticală, sistemul cu levitație magnetică și sistemul de tip pendul invers. Acesta este organizat în cinci subcapitole.

În primul subcapitol este prezentat pe larg algoritmul de modelare specific tehnicii transformării modelelor bazată pe TP.

În subcapitolul 2 este prezentată determinarea modelului TP pentru sistemul cu trei rezervoare amplasate pe verticală (Vertical Three Tank System – V3TS). Pentru a realiza o

analiză comparativă sunt determinate patru modele liniare pentru acest sistem: primele două modele liniare sunt obținute prin liniarizare în jurul a două puncte de funcționare, iar următoarele două modele sunt extrase din matricele sistem LTI ale modelului TP. În final, modelul TP determinat este testat în același scenariu cu modelul neliniar al V3TS, cu cele patru modele liniare și cu echipamentul de laborator utilizând un semnal de comandă de tip Semnal Pseudoaleator Binar (SPAB). Performanțele modelului TP sunt măsurate și evaluate prin patru indicatori de calitate (de performanță): eroarea medie pătratică (Root Mean Square Error – RMSE), Value of Accounted For (VAF), criteriul lui Akaike (Akaike Information Criterion – AIC) și criteriul lui Bayes (Bayesian Information Criterion – BIC). Rezultatele experimentale și valorile indicatorilor de performanță indică faptul că modelul TP determinat asigură performanțe bune de modelare, dar cu o anumită eroare numerică. Cele mai bune rezultate din punct de vedere al erorii medii pătratice sunt obținute de al patrulea model liniar pentru primul și al doilea rezervor și de modelul TP pentru cel de-al treilea rezervor. Cele mai bune performanțe din punct de vedere al VAF sunt înregistrate de al patrulea model liniar pentru toate cele trei rezervoare. Cu toate acestea, modelul TP are performanțe mai bune decât modelul neliniar și decât cele patru modele liniare în ceea ce privește valorile indicatorilor AIC și BIC.

În subcapitolul 3.3 este prezentată determinarea modelului TP pentru sistemul cu levitație magnetică (partial state feedback controlled Magnetic Levitation System - psfcMLS). Pentru a realiza o analiză comparativă sunt determinate patru modele liniare pentru acest sistem: primele două modele liniare sunt obținute prin liniarizare în jurul a două puncte de funcționare, iar următoarele două modele sunt extrase din matricele sistem LTI ale modelului TP. În final, modelul TP determinat este testat împreună cu modelul psfcMLS, cu cele patru modele liniare și cu echipamentul de laborator în patru scenarii de testare utilizând patru semnale de comandă de tip SPAB, sinus, chirp și semnal de tip Pulse Width Modulation (PWM). De asemenea, sunt calculate valorile pentru cei patru indicatori de calitate (de performanță): RMSE, VAF, AIC și BIC. Rezultatele experimentale și valorile indicatorilor de performanță indică faptul că cele mai bune performanțe în ceea ce privește valorile RMSE sunt obținute de modelul TP în al treilea scenariu de testare. Cele mai bune rezultate în ceea ce privește valorile indicatorului VAF sunt înregistrate în cazul modelului psfcMLS în primul scenariu de testare. Cel de-al treilea model liniar a înregistrat cele mai bune valori în ceea ce privește AIC și BIC în al patrulea scenariu de testare.

În cadrul subcapitolului 3.4 este prezentată determinarea modelului TP pentru sistemul de tip pendul invers (Pendulum Cart System - PCS). Pentru a realiza o analiză comparativă sunt determinate patru modele liniare pentru acest sistem: primul model liniar este obținut prin liniarizare în jurul unui punct de funcționare, iar următoarele trei modele sunt extrase din matricele sistem LTI ale modelului TP. În final, modelul TP determinat este testat împreună cu modelul neliniar al PCS, cu cele patru modele liniare și cu echipamentul de laborator în două scenarii de testare utilizând semnale de comandă de tip sinus și random. De asemenea, sunt calculate valorile pentru cei patru indicatori de calitate (de performanță): RMSE, VAF, AIC și BIC. Rezultatele experimentale și valorile indicatorilor de performanță arată faptul că modelul TP determinat asigură performanțe bune de modelare, dar cu o anumită eroare numerică.

În subcapitolul 3.5 sunt prezentate principalele contribuții și lucrările publicate.

În **Capitolul 4** sunt prezentați pașii algoritmului de modelare și proiectarea reguletoarelor TP pentru trei procese și anume: V3TS, psfcMLS și PCS. Acesta este organizat în cinci subcapitole.

În primul subcapitol este prezentat pe larg algoritmul de reglare specific tehnicii transformării modelelor bazată pe TP. Proiectarea este sistematică și urmărește realizarea a două specificații de performanță (garantarea stabilității și limitarea comenzii).

În subcapitolul 4.2 este prezentată validarea prin simulări și experimente a reguletoarelor TP proiectate pentru reglarea nivelului lichidului din cele trei rezervoare ale V3TS. Structura de reglare cu regulator TP (TPCS) este comparată cu patru structuri de reglare

după stare (SFCS) care sunt proiectate urmărind aceleași specificații de performanță ca în cazul TPCS. Cele cinci structuri de reglare sunt testate în același scenariu. Mai mult decât atât, pentru a îmbunătăți performanțele sistemelor de reglare, adică pentru a asigura eroare de reglare zero, cele cinci structuri sunt incluse în structuri de reglare în cascadă cu regulator Proporțional-Integrator-Derivativ (PID) în bucla principală (PID-TPCS și PID-SFCS) proiectate pentru fiecare rezervor. Aceste structuri de reglare sunt testate în același scenariu și sunt calculați patru indicatori de performanță: eroarea medie pătratică (Mean Square Error – MSE), valoarea medie pătratică a comenzii (MSU), timpul de reglare și suprareglajul. Cele mai bune valori în ceea ce privește MSE sunt înregistrate în cazul primei structuri de reglare PID-SFCS pentru primul rezervor în scenariul de simulare și de a patra structură de reglare PID-SFCS pentru al doilea rezervor în scenariul experimental. Cele mai bune valori din punct de vedere al MSU sunt obținute de a doua structură de reglare SFCS pentru toate cele trei rezervoare în scenariul de simulare și de către a patra structură de reglare PID-SFCS pentru al doilea rezervor în scenariul experimental. Suprareglajul este înregistrat pentru structura de reglare PID-SFCS și a celei de-a doua structuri de reglare în scenariul de simulare și pentru TPCS și cele patru SFCS pentru cel de-al doilea rezervor pentru cel de-al doilea rezervor în scenariul experimental. Primele cinci structuri de reglare nu asigură eroarea de reglare nulă, fapt ce a justificat proiectarea structurilor de reglare în cascadă.

În subcapitolul 4.3 este prezentată validarea prin simulări și experimente a reguletoarelor TP proiectate pentru reglarea poziției sferei din cadrul psfMLS. Structura de reglare cu regulator TP (TPCS) este comparată cu patru structuri de reglare după stare (SFCS) care sunt proiectate urmărind aceleași specificații de performanță ca în cazul TPCS. Cele cinci structuri de reglare sunt testate în același scenariu. Mai mult decât atât, pentru a îmbunătăți performanțele sistemelor de reglare, adică pentru a asigura eroare de reglare zero, cele cinci structuri sunt incluse în structuri de reglare în cascadă cu regulator Proporțional-Integrator (PI) în bucla principală (PI-TPCS și PI-SFCS). Aceste structuri de reglare sunt testate în același scenariu și sunt calculați cei patru indicatori de performanță: MSE, MSU, timpul de reglare și suprareglajul. Cele mai bune valori în ceea ce privește MSE sunt obținute în cazul primei structuri de reglare PI-SFCS în scenariul de simulare și de PI-TPCS în scenariul experimental. Cele mai bune valori din punct de vedere al MSU sunt obținute de prima structură de reglare SFCS în scenariul de simulare și de TPCS în scenariul experimental. Cel mai bun timp de reglare este înregistrat în cazul celor patru structuri de reglare SFCS în scenariul de simulare, iar suprareglajul este înregistrat în cazul PI-TPCS și al primelor trei structuri de reglare de tip SFCS în scenariul experimental. Primele cinci structuri de reglare nu asigură eroarea de reglare nulă, fapt ce a justificat proiectarea structurilor de reglare în cascadă.

În subcapitolul 4.4 este prezentată validarea prin simulări și experimente a reguletoarelor TP proiectate pentru reglarea poziției căruciorului din cadrul PCS. Structura de reglare cu regulator TP (TPCS) este comparată cu patru structuri de reglare după stare (SFCS) care sunt proiectate urmărind aceleași specificații de performanță ca în cazul TPCS. Cele cinci structuri de reglare sunt testate în același scenariu. Mai mult decât atât, pentru a îmbunătăți performanțele sistemelor de reglare, adică pentru a asigura eroare de reglare zero, cele cinci structuri sunt incluse în structuri de reglare în cascadă cu regulator PI în bucla principală (PI-TPCS și PI-SFCS). Aceste structuri de reglare sunt testate în același scenariu și sunt calculați cei patru indicatori de performanță: MSE, MSU, timpul de reglare și suprareglajul. În scenariul de simulare, cele mai bune performanțe în ceea ce privește valorile MSE sunt înregistrate în cazul PI-TPCS, pe când în scenariul experimental cele mai bune performanțe în ceea ce privește valorile MSE sunt înregistrate de structura de reglare TPCS. Cel mai bun timp de reglare este obținut în cazul structurii de reglare PI-TPCS atât în scenariul de simulare cât și în cel experimental. Primele cinci structuri de reglare nu asigură eroarea de reglare nulă, fapt ce a justificat proiectarea structurilor de reglare în cascadă.

În ultimul subcapitol sunt prezentate concluziile și publicațiile care susțin rezultatele

din acest capitol.

În **capitolul 5** sunt prezentate principalele concluzii, contribuțiile personale, o listă a lucrărilor și direcții de cercetare ulterioare. Rezultatele obținute în cadrul tezei sunt în 14 lucrări publicate autoarea tezei fiind prim autor la 12 din cele 14 lucrări:

- 4 lucrări publicate în reviste cu factor de impact **indexate în ClarivateAnalytics Web of Science** (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge), cu un **factor de impact cumulat de 10.516** conform Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2021; **autoarea este prim autor la două lucrări publicate în revista de specialitate Asian Journal of Control (cu factor de impact de 3.452) situată în cuartila Q2**; autoarea este prim autor la una din celelalte două lucrări publicate într-o revistă situată în cuartila Q3; **una din cele două lucrări publicate în Asian Journal of Control are statut de „Top Cited Article in 2020-2021”** conform Wiley.
- 10 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate în Clarivate Analytics Web of Science (cu una din denumirile anterioare ISI Web of Knowledge); în cadrul acestora sunt incluse **conferințele principale ale unor societăți IEEE (International Conference on Systems, Man and Cybernetics – IEEE SMC, International Symposium on Industrial Electronics – ISIE)** și conferința reprezentativă de automatică din România (**International Conference on System Theory, Control and Computing**).

Lucrările publicate au primit (la nivelul lui iunie 2022) în total **49 citări independente** (excluzând autocitările și citările tuturor coautorilor). **Factorul de impact cumulat al citărilor independente este 150.922** conform Journal Citation Reports (JCR) publicat de Clarivate Analytics în 2021. Citările sunt grupate în funcție de bazele de date internaționale în care sunt indexate:

- 44 citări indexate în Clarivate Analytics Web of Science (43 în reviste și 1 în volum de conferință);
- 5 citări indexate în Google Scholar.

Teza conține patru anexe în cadrul cărora sunt prezentate valorile numerice ale parametrilor modelelor TP și ale matricelor reguletoarelor TP.

Teza de doctorat cuprinde:

- 116 de pagini,
- 79 de figuri,
- 19 tabele și
- 122 referințe bibliografice.

Bibliografie semnificativă

- [Bar04b] P. Baranyi, "TP model transformation as a way to LMI-based controller design," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 2, pp. 387-400, 2004.
- [Bar06c] P. Baranyi and Y. Yam, "Case study of the TP-model transformation in the control of a complex dynamic model with structural nonlinearity," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no.3, pp. 895-904, 2006.
- [Bar13] P. Baranyi, Y. Yam, and P. Varlaki, TP Model Transformation in Polytopic Model-Based Control. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2013.
- [Bar14] P. Baranyi, "The generalized TP model transformation for T-S fuzzy model manipulation and generalized stability verification," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 22, no. 4, pp. 934-948, 2014.
- [Bar16] P. Baranyi, TP-Model Transformation-Based-Control Design Frameworks. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

- [Bar22a] P. Baranyi, "Extracting LPV and qLPV structures from state-space functions: a TP model transformation based framework," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 499-509, 2022.
- [Eig16a] G. Eigner, I.J. Rudas, and L. Kovács, "Investigation of the TP-based modeling possibility of a nonlinear ICU diabetes model," in *Proc. 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Budapest, Hungary, 2016, pp.3405-3410.
- [Gal15b] P. Galambos and P. Baranyi, "TP Model transformation: a system modeling framework to handle internal time delays in control systems," *Asian Journal of Control*, vol. 17, no. 2, pp. 1-11, 2015.
- [Hed17a] L.-E. Hedrea, C.-A. Bojan-Dragos, R.-E. Precup, R.-C. Roman, E.M. Petriu, and C. Hedrea, "Tensor product-based model transformation for position control of magnetic levitation systems," in *Proc. IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics*, Edinburgh, UK, 2017, pp. 1141-1146.
- [Hed19c] E.-L. Hedrea, R.-E. Precup, C.-A. Bojan-Dragos, and C. Hedrea, "TP-based fuzzy control solutions for magnetic levitation systems," in *Proc. 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing*, Sinaia, Romania, 2019, pp. 809-814.
- [Hed19e] E.-L. Hedrea, R.-E. Precup, and C.-A. Bojan-Dragos, "Results on tensor product-based model transformation of magnetic levitation systems," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 16, no. 9, pp. 93-111, 2019.
- [Hed21a] E.-L. Hedrea, R.-E. Precup, E.M. Petriu, C.-A. Bojan-Dragos, and C. Hedrea, "Tensor product-based model transformation approach to cart position modeling and control in pendulum-cart systems," *Asian Journal of Control*, vol. 23, pp. 1238-1248, 2021.
- [Kor06] P. Korondi and Z. Peters, "Sliding mode control based on tensor product model transformation," in *Proc. 2006 IEEE International Conference on Mechatronics*, Budapest, Hungary, 2006, pp. 672-677.
- [Kov16] L. Kovács and G. Eigner, "Convex polytopic modeling of diabetes mellitus: a Tensor Product based approach," in *Proc. 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Budapest, Hungary, 2016, pp. 3393-3398.
- [Kuc21] M. Kuczmann, "Study of tensor product model alternatives," *Asian Journal of Control*, vol. 23, no. 3, pp. 1249-1261, 2021.
- [Nag08] S. Nagy, Z. Peters, and P. Baranyi, "TP model transformation based controller design for the parallel-type double inverted pendulum," in *Proc. 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Hong Kong, China, 2008, pp. 1374-1380.
- [Pet07] Z. Peters, P. Baranyi, P. Korondi, and H. Hashimoto, "Trajectory tracking by TP model transformation: case study of a benchmark problem," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 3, pp. 1654-1663, 2007.
- [Pre12] R.-E. Precup, C.-A. Dragos, S. Preitl, M.-B. Radac, and E.M. Petriu, "Novel Tensor Product models for automatic transmission system control," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 488-498, 2012.
- [Pre15] R.-E. Precup, E.M. Petriu, M.-B. Radac, S. Preitl, L.-O. Fedorovici, and C.-A. Dragos, "Cascade control system-based cost effective combination of tensor product model transformation and fuzzy control," *Asian Journal of Control*, vol. 17, no. 2, pp. 381-391, 2015.
- [Tak21] B. Takarics and B. Vanek, "Robust control design for the FLEXOP demonstrator aircraft via tensor product models," *Asian Journal of Control*, vol. 23, no. 3, pp. 1290-1300, 2021.