

Teză de abilitare:

Proiectare bazată pe modele fuzzy de tip Takagi-Sugeno pentru sisteme în comutație și stabilizare locală

— Rezumat —

Zsófia Lendek

Focusul activității mele de cercetare a fost dezvoltarea unor metode automatizate de analiză a stabilității și de proiectare a legilor de control și estimare pentru sisteme neliniare reprezentate prin modele fuzzy de tip Takagi-Sugeno (TS) (Takagi and Sugeno, 1985). Modelul TS este o combinație convexă de modele liniare. Această structură facilitează analiza și proiectarea sistemelor neliniare prin folosirea unor algoritmi eficienți bazați pe funcții Lyapunov și inegalități matriceale liniare. Modelele TS sunt aproximatoare universale și, în plus, o clasă largă de sisteme neliniare pot fi reprezentate exact prin sisteme TS. În ultimele trei decenii au fost dezvoltate – într-un cadru riguros din punct de vedere matematic – multe rezultate privind astfel de modele. Reprezentarea TS poate, în principiu, să adapteze avantajele metodelor de proiectare folosite la sisteme liniare invariante în timp la sistemele neliniare.

Analiza și sinteza reguletoarelor și a estimatoarelor pentru modelele TS sunt realizate de obicei folosind metoda directă a lui Lyapunov, utilizând – clasic – funcții Lyapunov pătratice, înlocuite recent de către cele nepătratice. Deoarece există algoritmi eficienți pentru a rezolva inegalitățile matriceale liniare (LMI), scopul este de a dezvolta condițiile de stabilitate sau de proiectare într-o astfel de formă. Cercetarea mea recentă se concentrează pe analiza și proiectare de reguletoare și estimatoare pentru sisteme TS în timp discret.

În cazul sistemelor de timp discret, funcțiile Lyapunov ne-pătratice, în general cele fuzzy, au adus o îmbunătățire semnificativă privind dezvoltarea condițiilor globale de stabilitate și de proiectare (Guerra and Vermeiren, 2004; Ding et al., 2006; Dong and Yang, 2009; Lee et al., 2011). De asemenea, ele permit relaxarea condițiilor prin calculul diferenței între α – în loc de două – instanțe consecutive a funcției Lyapunov (Kruszewski et al., 2008) sau prin considerarea funcțiilor Lyapunov întârziate (Lendek et al., 2015a). Soluțiile obținute folosind funcții Lyapunov ne-pătratice includ și extind setul de soluții obținute folosind cele pătratice. Recent, prin folosirea teoremei lui Polya (Montagner et al., 2007; Sala and Ariño, 2007), au fost obținute condiții LMI asimptotic necesare și suficiente (ANS) pentru o funcție Lyapunov dată. Ding (2010) a dezvoltat condiții ANS de stabilitate pentru cazul general în care matricea Lyapunov este dependentă de funcția de apartenență. Prin creșterea complexității funcțiilor Lyapunov dependente de parametrii omogeni, în teorie, orice funcție Lyapunov suficient de netedă poate fi aproximată cu o precizie dorită. Din păcate, numărul de LMI-uri care trebuie rezolvate crește rapid, ducând la intractabilitate numerică (Zou and Yu, 2014). În cazul tuturor rezultatelor amintite, în cazul în care condițiile dezvoltate sunt fezabile, atunci stabilitatea sistemului corespunzător este asigurată la nivel global - de fapt, în cel mai mare set de nivel

Lyapunov inclus în domeniul în care este definit modelul TS. Cu toate acestea, este posibil ca stabilitatea (sistemului în bucla închisă sau dinamicii de eroare, după caz) să nu poată fi asigurată pe domeniul complet unde este definit modelul TS. Astfel, problemele de control și de estimare rămân deschise datorită limitărilor computaționale și conservatismului metodelor existente.

Cercetarea mea postdoctorală și mai recentă se concentrează pe dezvoltarea unor metode de proiectare pentru sistemele care prezintă o structură cum ar fi periodicitatea sau de comutație. Scopul meu principal a fost încorporarea structurii cunoscute în etapele de proiectare și astfel reducerea conservatismului condițiilor de analiză sau proiectare.

Modelele periodice și de comutație pot fi găsite în numeroase domenii, cum ar fi industria auto, aeronautică, aerospațială și chiar controlul digital al proceselor industriale. De exemplu, Chauvin et al. (2005) utilizează un model dinamic periodic pentru a estima raportul aer-combustibil în fiecare cilindru pe un motor cu combustie internă, Gaiani et al. (2004) propun un model periodic pentru lamele rotorului elicopterului etc. Modelele de comutație sunt, de asemenea, întâlnite frecvent în problemele de control în aplicații cum ar fi combustia HCCI (Liao et al., 2013), motoare cu turbocompresor (Nguyen et al., 2012b,a, 2013), controlul acționării ambreiajului (Langjord et al., 2008), etc.

În literatura de specialitate au fost considerate în principal sisteme în comutație în timp continuu, dar recent au fost dezvoltate și abordări în timp discret (Chen et al., 2012; Duan and Wu, 2012; Hetel et al., 2011). Condiții de stabilizare și de urmărire pentru sisteme liniare în comutație au fost dezvoltate în (Baglietto et al., 2013; Battistelli, 2013), condiții de stabilizare pentru sisteme în comutație cu întârziere în (Kim et al., 2008), iar analiza observabilității în cazul intrărilor necunoscute a fost investigată de către Boukhobza and Hamelin (2011).

Motivată de dezvoltările descrise mai sus, prima parte majoră a tezei consideră sisteme neliniare periodice și în comutație reprezentate de modelele TS, în special cazul în care subsistemele pot fi instabile, necontrolabile sau neobservabile. În această parte sunt prezentate condiții suficiente de stabilitate respectiv de proiectare a estimatoarelor și a reguletoarelor pentru astfel de sisteme, dezvoltate pe baza unor funcții Lyapunov ne-pătratică periodice sau în comutație. Mai mult, este bine cunoscut faptul că prin comutarea între două subsisteme independent stabile, sistemul în comutație poate fi destabilizat și invers, prin comutarea între subsisteme instabile, stările pot converge la zero. Condițiile în care există o regulă de comutație care stabilizează un sistem în comutație și proiectarea acestuia sunt deasemenea prezentate. Toate condițiile dezvoltate sunt ilustrate în exemple numerice.

Cea de-a doua parte majoră a tezei se referă la o altă problemă mai fundamentală în cadrul sistemelor TS. Sistemele neliniare în general pot avea mai multe puncte de echilibru, iar metodele existente în cadrul sistemelor TS discrete – care implică condiții globale – nu pot determina stabilitatea locală a unui punct de echilibru. Mai mult, o problemă de interes în cazul sistemelor neliniare este determinarea unei estimări a domeniului de atracție a unui punct de echilibru. Folosind o funcție Lyapunov pătratică poate fi obținut un domeniu pătratic, dar acest domeniu poate fi foarte restrictiv în comparație cu adevăratul domeniu de atracție. Rezultatele ne-pătratică curente, cum ar fi cele din (Lee et al., 2013), necesită cunoașterea a priori a unor limite a variației în timp a funcțiilor de apartenență, în timp ce în (Lee and Joo, 2014), limitele derivatei funcției de apartenență sunt introduse direct în condițiile de stabilitate. Această procedură este complexă iar costurile de calcul sunt mari, în special pentru

implementări practice. Din aceste considerente, a doua parte a lucrării prezintă metode de analiză a stabilității locale și metode de proiectare a reguletoarelor și estimatoarelor locale pentru modele TS. Instrumentele existente în cadrul sistemelor TS discrete sunt combinate cu determinarea unui domeniu ne-pătratic de atracție folosind o procedură ușoară care necesită doar cunoașterea funcțiilor de apartenență. Ca și în prima parte a tezei, toate condițiile dezvoltate sunt ilustrate în exemple numerice.

Cele două direcții de mai sus, sistemele în comutație și analiza și proiectarea locală, cuprind principalele rezultate ale cercetării mele post-doctorale. Direcțiile de cercetare suplimentare și aplicațiile sunt prezentate în capitole separate. Cercetările rezultate direct din activitatea doctorală nu sunt discutate, chiar dacă au fost efectuate sau publicate după data doctoratului. În mod similar, nu sunt menționate activitățile la care am participat dar fără a avea un rol important.

În rezumat, contribuțiile importante prezentate în această teză sunt, în ordinea în care sunt discutate:

- Condiții de stabilitate pentru sisteme periodice și în comutație (Lendek et al., 2012b, 2013a,c).
- Metode de proiectare de reguletoare pentru sisteme periodice și în comutație (Lendek et al., 2014a, 2013b).
- Stabilizare prin comutație (Lendek et al., 2016).
- Metode de proiectare de estimatoare pentru sisteme periodice și în comutație (Lendek et al., 2012a, 2014b, 2015b).
- Condiții de stabilitate locală (Lendek and Lauber, 2016b).
- Extensia acestora pentru stabilizare locală (Lendek and Lauber, 2016a; Lendek et al., 2018).
- Metode de proiectare a estimatoarelor locale (Marx and Lendek, 2017).
- Validări numerice detaliate pentru toate metodele.

În viitor mă voi baza pe expertiza mea în analiza și proiectarea metodelor de reglare și estimare în sistemele neliniare pentru a dezvolta un set de instrumente algoritmice pentru proiectarea automată a estimatoarelor și a reguletoarelor aplicabile unei game largi de sisteme, însoțite de garanții analitice de performanțe și cu aplicabilitate practică. Deși experiența în sisteme fuzzy furnizează un punct de pornire foarte bun, interesele de cercetare nu îmi sunt limitate la acest subiect. De fapt, sunt interesată de a identifica noi oportunități în domeniul mai larg al sistemelor și controlului. Deși cercetarea propusă va fi în primul rând fundamentală, aplicațiile vor fi clare, astfel încât să atragă finanțare atât din industrie, cât și de la agenții de finanțare. Rezultate obținute vor servi ca o platformă solidă pentru a explora noi direcții de cercetare.

Bibliografie

- Baglietto, M., Battistelli, G., and Tesi, P. (2013). Stabilization and tracking for switching linear systems under unknown switching sequences. *Systems & Control Letters*, 62:11–21.
- Battistelli, G. (2013). On stabilization of switching linear systems. *Automatica*, 49:1162–1173.
- Boukhobza, T. and Hamelin, F. (2011). Observability of switching structured linear systems with unknown input. A graph-theoretic approach. *Automatica*, 47:395–402.
- Chauvin, J., Moulin, P., Corde, G., Petit, N., and Rouchon, P. (2005). Real-time nonlinear individual cylinder air-fuel ratio observer on a diesel engine test bench. In *Preprints of the IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic.
- Chen, Y.-J., Ohtake, H., K. Tanaka, Wang, W.-J., and Wang, H. (2012). Relaxed stabilisation criterion for discrete T-S fuzzy systems by minimum-type piecewise non-quadratic Lyapunov function. *IET Control Theory and Applications*, 6(12):1918–1925.
- Ding, B. (2010). Homogeneous polynomially nonquadratic stabilization of discrete-time Takagi-Sugeno systems via nonparallel distributed compensation law. *IEEE Transactions of Fuzzy Systems*, 18(5):994–1000.
- Ding, B., Sun, H., and Yang, P. (2006). Further studies on LMI-based relaxed stabilization conditions for nonlinear systems in Takagi-Sugeno’s form. *Automatica*, 42(3):503–508.
- Dong, J. and Yang, G. (2009). Dynamic output feedback H_∞ control synthesis for discrete-time T-S fuzzy systems via switching fuzzy controllers. *Fuzzy Sets and Systems*, 160(19):482–499.
- Duan, C. and Wu, F. (2012). Switching control synthesis for discrete-time switched linear systems via modified Lyapunov-Metzler inequalities. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 3186–3191, Montreal, Canada.
- Gaiani, G., Lovera, M., Colaneri, P., and Celi., R. (2004). Discrete-time analysis of HHC schemes for helicopter vibration attenuation. In *Proceedings of the IFAC Workshop on Periodic Control Systems*, pages 69–74, Yokohama, Japan.
- Guerra, T. M. and Vermeiren, L. (2004). LMI-based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the Takagi-Sugeno’s form. *Automatica*, 40(5):823–829.
- Hetel, L., Kruszewski, A., Perruquetti, W., and Richard, J. (2011). Discrete-time switched systems, set-theoretic analysis and quasi-quadratic Lyapunov functions. In *Proceedings of the Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 1325–1330, Corfu, Greece.
- Kim, S., Campbell, S. A., and Liu, X. (2008). Delay independent stability of linear switching systems with time delay. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 339:785–801.
- Kruszewski, A., Wang, R., and Guerra, T. M. (2008). Nonquadratic stabilization conditions for a class of uncertain nonlinear discrete time TS fuzzy models: A new approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 53(2):606–611.
- Langjord, H., Johansen, T., and Hespanha, J. P. (2008). Switched control of an electropneumatic clutch actuator using on/off valves. In *Proceedings of the American Control*

- Conference*, pages 1513–1518, Seattle, Washington, USA.
- Lee, D. and Joo, Y. (2014). On the generalized local stability and local stabilization conditions for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22(6):1654–1668.
- Lee, D., Joo, Y., and Tak, M. (2013). Linear matrix inequality approach to local stability analysis of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems. *IET Control Theory & Applications*, 7(9):1309–1318.
- Lee, D. H., Park, J. B., and Joo, Y. H. (2011). Approaches to extended non-quadratic stability and stabilization conditions for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems. *Automatica*, 47(3):534–538.
- Lendek, Zs., Guerra, T. M., and Lauber, J. (2015a). Controller design for TS models using non-quadratic Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 45(3):453–464.
- Lendek, Zs. and Lauber, J. (2016a). Local quadratic and nonquadratic stabilization of discrete-time TS fuzzy systems. In *Proceedings of the 2016 IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pages 2182–2187, Vancouver, Canada.
- Lendek, Zs. and Lauber, J. (2016b). Local stability of discrete-time TS fuzzy systems. In *4th IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Sciences*, pages 7–12, Reims, France.
- Lendek, Zs., Lauber, J., and Guerra, T. M. (2012a). Switching fuzzy observers for periodic TS systems. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, pages 1–6, Cluj, Romania.
- Lendek, Zs., Lauber, J., and Guerra, T. M. (2012b). Switching Lyapunov functions for periodic TS systems. In *Proceedings of the 1st IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control*, pages 1–6, Würzburg, Germany.
- Lendek, Zs., Lauber, J., and Guerra, T. M. (2013a). Periodic Lyapunov functions for periodic TS systems. *Systems & Control Letters*, 62(4):303–310.
- Lendek, Zs., Lauber, J., Guerra, T. M., and Raica, P. (2013b). On stabilization of discrete-time periodic TS systems. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Fuzzy systems*, pages 1–7, Hyderabad, India.
- Lendek, Zs., Lauber, J., Guerra, T. M., and Raica, P. (2013c). Stability analysis of switching ts models using α -samples approach. In *Proceedings of the 3rd IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Science*, pages 207–211, Chengdu, China.
- Lendek, Zs., Páll, E., Nagy, Z., and Lauber, J. (2018). Local stabilization of discrete-time TS descriptor systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67:409–418.
- Lendek, Zs., Raica, P., Guerra, T. M., and Lauber, J. (2016). Finding a stabilizing switching law for switching ts models. *International Journal of Systems Science*, 47(12):2762–2772.
- Lendek, Zs., Raica, P., Lauber, J., and Guerra, T. M. (2014a). Nonquadratic stabilization of switching ts systems. In *Preprints of the 2014 IFAC World Congress*, pages 7970–7975, Cape Town, South Africa.
- Lendek, Zs., Raica, P., Lauber, J., and Guerra, T. M. (2014b). Observer design for switching

- nonlinear systems. In *Proceedings of the 2014 IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pages 1–6, Beijing, China.
- Lendek, Zs., Raica, P., Lauber, J., and Guerra, T. M. (2015b). *Observer design for discrete-time switching nonlinear models*, volume 457 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, chapter 2, pages 27–58. Springer.
- Liao, H.-H., Widd, A., Ravi, N., Jungkunz, A. F., Kang, J.-M., and Gerdes, J. C. (2013). Control of recompression HCCI with a three region switching controller. *Control Engineering Practice*, 21(2):135–145.
- Marx, B. and Lendek, Zs. (2017). Local observer design for discrete-time TS systems. In *Preprints of the 20th IFAC World Congress*, pages 873–878, Toulouse, France.
- Montagner, V. F., Oliveira, R. C. L. F., and Peres, P. L. D. (2007). Necessary and sufficient LMI conditions to compute quadratically stabilizing state feedback controllers for Takagi-Sugeno systems. In *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, pages 4059–4064, New York, NY, USA.
- Nguyen, A., Lauber, J., and Dambrine, M. (2012a). Robust H_∞ control design for switching uncertain system: Application for turbocharged gasoline air system control. In *Proceedings of the 51st Conference on Decision and Control*, pages 1–6, Maui, Hawaii, USA.
- Nguyen, A., Lauber, J., and Dambrine, M. (2012b). Switching fuzzy control of the air system of a turbocharged SI engine. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pages 1–6, Brisbane, Australia.
- Nguyen, A., Lauber, J., and Dambrine, M. (2013). Multi-objective control design for turbocharged spark ignited air system: a switching Takagi-Sugeno model approach. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 1–6, Washington DC, USA.
- Sala, A. and Ariño, C. (2007). Asymptotically necessary and sufficient conditions for stability and performance in fuzzy control: Applications of Polya’s theorem. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(24):2671–2686.
- Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15(1):116–132.
- Zou, T. and Yu, H. (2014). Asymptotically necessary and sufficient stability conditions for discrete-time Takagi-Sugeno model: Extended applications of Polya’s theorem and homogeneous polynomials. *Journal of the Franklin Institute*, 351(2):922–940.

Despre autor

Zsófia Lendek este conferențiar universitar din 2013 la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, România, unde a fost și șef de lucrări în perioada 2011-2013. Ea a primit doctoratul în 2009 de la Universitatea Tehnică din Delft (*Technische Universiteit Delft*), Olanda, și diploma de inginer în 2003 la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. A activat pe poziții de cercetător la TUDelft, și Universitatea din Valenciennes, Franța. Interesele ei de cercetare includ analiza

stabilității și proiectarea estimatoarelor și a reguletoarelor pentru sisteme neliniare, în special folosind reprezentări prin modele fuzzy Takagi-Sugeno.