

Záró beszámoló a

72911 azonosító számú OTKA Kutatási Pályázathoz

Cím: Digitálisan szabályozott gépészeti rendszerek dinamikája
(Dynamics of digitally controlled mechanical systems)

Vezető kutató: Insperger Tamás

Résztvevő kutatók: Szabó Zsolt, Lukács Attila, Forberger Árpád, Tóth Viktor, Dombóvári Zoltán

Beszámoló időszak: 2008-04-01 - 2011-12-31

A kutatási projektben digitálisan szabályozott mérnöki szerkezet stabilitásvizsgálatával foglalkoztunk figyelembe véve a szabályozás visszacsatolásának időkésését. A kutatási projektben a következő témákkal foglalkoztunk:

- Dinamikai rendszerek szabályozása időkésést tartalmazó visszacsatolás esetén
- Szerszámgéprezgések stabilitásvizsgálata
- Torziós rezgéscillapítás elektorreológiai folyadékokkal
- Egyensúlyozás reflexkéséssel
- A szemi-diszkrétizációs módszer fejlesztése

A kutatás során elért eredmények közül a következőket emeljük ki:

- Stépán Gábor akadémikussal közösen könyvet írtunk a szemi-diszkrétizációs módszerről és annak mérnöki alkalmazásairól. A könyv 2011 nyarán jelent meg a Springer kiadó gondozásában [1].
- A kutatási projekt keretében belül egy PhD védésre került sor 2009-ben (Lukács Attila) [2].
- A kutatási projekt témájához kapcsolódóan még egy PhD disszertáció megírására is várhatóan sor kerül 1 éven belül (Forberger Árpád).
- A kutatás eredményeként 33 publikáció született, amelyből 14 folyóiratcikk (Σ impakt faktor = 16,9).
- A kutatási projekt témájához kapcsolódóan egy MTA doktora disszertáció került benyújtásra 2011 őszén (Insperger Tamás).

Az alábbiakban az egyes témákban elért eredményeket ismertetjük részletesen.

Dinamikai rendszerek szabályozása időkésést tartalmazó visszacsatolás esetén

Dinamikai folyamatok szabályozása során a visszacsatolás időkésése gyakran vezethet nem kívánatos rezgésekhez, a folyamat instabilitásához. Az effajta rezgések elkerülésére dolgoztuk ki korábban az ún. beavatkozom-és-várok (act-and-wait) szabályozási elvet, amely azon alapul, hogy a visszacsatolást bizonyos időközönként ki-és bekapcsolgatjuk. A módszert ugyan már korábban (részben egy korábbi OTKA kutatási projekt keretében) kidolgoztuk, de több olyan részfeladat maradt, amely még tisztázásra szorult. Késleltetést tartalmazó rendszereket általában végtelen dimenziós fázistérben lehet leírni, a beavatkozom-és-várok módszerrel azonban, ha a várakozási (vagy kikapcsolási) idő nagyobb, mint az időkésés, a rendszer véges dimenziójúvá redukálható. A most lezárult OTKA projekt keretében megmutattuk, hogy bizonyos paramétertartományokban a rendszer akkor is leírható véges dimenzióban, ha az időkésés nagyobb, mint a várakozási idő.

Egy egy dimenziós rendszeren keresztül részletesen vizsgáltuk a szabályozás tulajdonságait, a stabilizálhatóság feltételét, a szabályozott rendszer érzékenységét kis perturbációkra. Az eredményeket indiai, angol és olasz társszerzőkkel folyóiratcikkben publikáltuk [3].

A témához kapcsolódóan megmutattuk, hogy általánosabb folytonos-idejű szabályozások esetén a beavatkozom-és-várok szabályozás tekinthető a késleltetett rendszerekre megfogalmazott Brockett-probléma egyfajta megoldásának. Az eredményekről először nemzetközi konferencián tartottunk előadást 2008-ban [4], majd a módszer általánosabb rendszerekre való alkalmazását a folyóiratcikkben publikáltuk [5].

A beavatkozom-és-várok szabályozási elv hatékonyságát kísérletekkel ellenőriztük egy 1 szabadsági fokú erőszabályozási rendszerre. A kísérleti berendezéssel mind diszkrét idejű, mind (megközelítőleg) folytonos idejű szabályozási folyamatot meg tudtunk valósítani. A kísérleti eredmények mindkét esetben alátámasztották az elméleti eredményeket: a beavatkozom-és-várok módszer alkalmazásával az erőszabályozásban a proporcionális tag jelentősen növelhető, aminek következtében a kialakuló erőhiba jelentősen csökken mind a diszkrét mind a folytonos idejű szabályozás esetén. A diszkrét idejű (mintavételezett) rendszer vizsgálati eredményeit először konferencia [6] cikkben, majd általánosabb alakban folyóiratcikként publikáltuk [7]. A folytonos idejű rendszer vizsgálati eredményeit szintén nemzetközi konferenciaként publikáltuk, mely cikket a konferencia szervezői beválasztották a 40 legjobb cikk közé (a 200 közül), és így könyvfejezetként is megjelent – a közlemények listájában ezt a könyvfejezetet tüntettük fel [8].

A beavatkozom-és-várok szabályozási elv alkalmazhatóságát vizsgáltuk instabil másodrendű rendszerekre. Ez a modell a reflex-késéssel történő inga-egyensúlyozást írja le. Ismeretes, hogy adott hosszúságú inga egyszerű PD szabályozóval nem egyensúlyozható tetszőlegesen nagy reflex-késéssel. Megmutattuk, hogy a beavatkozom-és-várok szabályozással olyan esetekben is lehet stabilan egyensúlyozni egy rudat, amelyeknél az egyszerű PD szabályozó már nem eredményez stabil egyensúlyozást. Az eredményeket, mint a beavatkozom-és-várok szabályozási elv esettanulmányát konferencián publikáltuk 2009-ben [9].

Olyan esetben, amikor a szabályozási folyamat visszacsatolásának az időkéseése egy bonyolultabb rendszer állapotától függ, gyakran használnak időben sztochasztikusan változó időkéseést a modellekben. Ilyen pl. amikor valamilyen hálózaton (pl. interneten) keresztül történik a szabályozás. Ekkor az információ terjedésének sebessége függ a hálózatban levő egyéb folyamatoktól (pl. az internet leterheltségétől). Az OTKA kutatási projektjében a beavatkozom-és-várok szabályozási elv alkalmazhatóságát vizsgáltuk ilyen rendszerekre. Megmutattuk, hogy ha az időkéseés bizonyos határok között változik valamilyen valószínűségi eloszlás szerint, akkor a beavatkozom-és-várok szabályozási elv segítségével a stabilitási vizsgálat is egyszerűsödik, és a szabályozott rendszer stabilitási tulajdonságai is javulnak. Az eredményekről konferencia cikkben számolunk be [10].

Szerszámgéprezgések stabilitásvizsgálata

Esztergálási, marási illetve fúrási folyamatok pontos modellezéséhez dolgoztunk ki több szabadsági fokú modelleket, melynek leíró egyenlete egy autonóm állapotfüggő időkéseést tartalmazó késleltetett differenciálegyenlet. Az állapotfüggő késleltetés miatt ez a rendszer erősen nemlineáris. Bár a hagyományos linearizálás nem használható ilyen egyenleteknél, mégis létezik módszer, amellyel a nemlineáris rendszerhez hozzárendelhető egy lineáris egyenlet. Az állapotfüggő időkéseésből adódó tag általában kicsi, azonban bizonyos esetekben (pl. nagy előtolás esetén) befolyásolhatja az esztergálási folyamat stabilitási tulajdonságait. Esztergálás esetén a rendszer nemlineáris viselkedését numerikus úton vizsgálatuk, és azt az eredményt kaptuk, hogy a hagyományos modellekkel kapott szubkritikus Hopf bifurkáció helyett az állapotfüggő időkéseést tartalmazó modelleknél bizonyos paraméterek esetén szuperkritikus bifurkáció keletkezik, ami

mérnöki szempontból jóval kedvezőbb. Az eredményekről egy mélyfűrással/olajfűrással foglalkozó kutatók által szervezett mechanikai kollokviumon tartottunk előadást [11].

Marási folyamatok során keletkező felület alakhibáit vizsgáltuk ferdeélű marószerszámmal történő megmunkálás esetén. A szemi-diszkretizációs módszer segítségével megmutattuk, hogy a szerszámélek ferde elhelyezkedése nem csak a marási folyamat stabilitási tulajdonságait befolyásolja, hanem a megmunkált felület alakhibájára is hatással van. Az eredményekről folyóiratcikkben számoltunk be [12].

Amerikai partnerekkel közösen az ún. időbeni végeselemes módszert használva megmutattuk, hogy alacsony fordulatszámú esztergálási folyamatoknál a fordulatszám-fogásmélység paraméter síkon a stabilitási határok magasabbak, ha megoszló időkéssel modellezzük a szerszámélen a forgács és a szerszám közötti érintkezést. Az eredmények korábban már ismertek voltak folytonos esztergálási folyamatra, a mi eredményeink megszakított esztergálási folyamatokra vonatkoznak (pl. bordás tengely, vagy hornyos tengely megmunkálására). Az eredményeket a folyóiratcikkben publikáltuk [13].

Marási folyamatok rezgés csökkentési lehetőségeit vizsgáltuk váltakozó fordulatszámú megmunkálás esetén francia partnerekkel közösen. Megmutattuk, hogy az orsó sebességét az időben periodikusan változtatva a regeneratív rezgések bizonyos paramétertartományban csökkenthetők. A rendszert leíró periodikus időkést tartalmazó differenciálegyenlet stabilitásvizsgálatát a szemi-diszkretizációs módszerrel végeztük el, míg a kísérleti méréseket a francia partner laboratóriumában végeztük el. Az eredményekről két konferencia cikk [14, 15] és két folyóirat cikk született [16, 17].

Marási folyamatok során keletkező rezgési frekvenciák meghatározása nem triviális, mivel a folyamatosan ki- és belépő fogak okozta paraméteres gerjesztés miatt végtelen sok frekvencia megjelenhet a rezgési jelben. A domináns frekvenciák kiválasztása ezért kiemelt fontosságú. Kidolgoztunk egy módszert, amely a szemi-diszkretizáció alapján a végtelen sok frekvencia közül kiszűri a domináns frekvenciákat, amelyek a rezgés során nagyobb amplitúdóval jelentkeznek. Az eredményekről konferencián számoltunk be [18], illetve mérési eredményekkel alátámasztva folyóiratban is publikáltuk a módszert [19].

Egy magyar-USA hallgatócsere keretében kiküldött magyar hallgatóval (Eppel András) és az amerikai partnerekkel közösen kidolgoztunk egy módszert, amivel a marási folyamatok során keletkező rezgéseket lehet optikai úton mérni. Az eredményekről folyóiratcikkben számoltunk be [20].

Spanyol partnerekkel folytatott közös kutatómunkaként a marószerszám leglágabb lengésképének az irányának a függvényben vizsgáltuk a forgácsolási folyamat során keletkező rezgések stabilitását. Itt megmutattuk, hogy ferde élű marószerszám és nagy axiális fogásmélység esetén a forgácsolási erők kiolthatják egymást a szerszám axiális iránya mentén, ezáltal az elméleti stabilitási határok végtelenül megemelkedhetnek. Ilyen esetekben a valóságos stabilitási határokat a rendszer nem modellezett magasabb frekvenciájú lengésképei generálják. Az eredményekről folyóiratcikkben számoltunk be [21].

Instabil forgácsolási folyamatok stabilizálásának egyik módszere az aktív szabályozók használata. Esztergálási folyamatok digitális szabályozással történő stabilitását vizsgáltuk a szemi-diszkretizációs módszerrel. A rezgéseket leíró mozgásegyenlet érdekessége, hogy két fajta időkést is tartalmaz, folytonos időkést, illetve diszkrét időkést, amikor az állapotváltozó argumentuma szakaszonként állandó. Megmutattuk, hogy a szemi-diszkretizáció alkalmas az ilyen jellegű egyenletek stabilitásvizsgálatára is. Bevezettük az egy-pontos és a két-pontos szemi-diszkretizáció fogalmát. Az esztergálási folyamatok stabilizálásáról folyóiratcikkben számoltunk be [22]. Általános késleltetett másodrendű egyenletek digitális szabályozóval történő stabilitásáról pedig konferenciacikket írtunk [23], melyet közlésre elfogadtak (a konferencia 2012 nyarán lesz).

Torziós rezgés csillapítás elektorreológiai folyadékokkal

Új kutatási területként indult a kutatócsoportban az elektorreológiai folyadékokkal való rezgés csillapítás. Az elektorreológiai folyadék csillapítását elektromos tér segítségével változtathatjuk, ezzel változtathatjuk a rezgőrendszer csillapítását is. Ezt a jelenséget vezérlési illetve szabályozási folyamatokban is fel lehet használni. Ez a kutatás elsősorban Forberger Árpád PhD témája volt, a PhD dolgozat benyújtása 1 éven belül várható.

Első lépésként tengelyek torziós rezgéseinek csillapításával foglalkoztunk. A modellben azt az optimális csillapítási értéket keressük, amely adott gerjesztési frekvencia esetén minimális rezgési amplitúdót és megfelelő üzemi hőmérsékletet biztosít. Ez a modell a járműiparban ismert inercia gyűrűvel ellátott torziós rezgés csökkentés vizsgálatára alkalmas. Az eredményekről egy hazai szervezésű [24] és egy nemzetközi konferencián számoltunk be [25]. Gyakorlati alkalmazásként tengelyek torziós rezgéseinek csillapítási lehetőségét vizsgáltuk az elektorreológiai csillapító folyadékok segítségével. A kutatás részeredményeiről nemzetközi konferencián számoltunk be [26].

Egyensúlyozás reflexkéséssel

Különböző modelleket dolgoztunk ki az egyensúlyozás leírására figyelembe véve az egyensúlyozott rúd szögkitérésének mérési módjait. Megmutattuk, hogy ha a szögkitérést gyorsulásérzékelővel mérjük, ahogy az sok gyakorlati alkalmazásban előfordul, és folytonosan mintavételezünk és folytonosan avatkozunk be (azaz nincs mintavételezés), akkor a rendszert leíró differenciálegyenlet egy siettetett (advanced) egyenlet lesz, és a rendszer mindig instabil lesz végtelen sok instabil gyökkel. Egy egyszerűsített egy dimenziós modellen keresztül megmutattuk, hogy a mintavételezés hatására az egyenlet siettetett jellege eltűnik, és a rendszer stabilan szabályozható lesz. Az eredményekről folyóiratcikkben számoltunk be [27].

A valósághoz egy lépéssel közelebbi modellként egy másodrendű rendszer esetében is megvizsgáltuk a jelenséget. Az egyensúlyozási folyamat vizsgálata céljából építettünk egy kísérleti berendezést, egy önmagát egyensúlyozó kis kétkerékű kocsit (Segwayt). A kocsit (inga) szöghelyzetét egy gyorsulásérzékelővel mértük, így a szabályozás bemenete a szöghelyzet és a szöggyorsulás lineáris kombinációja volt. Időkésés és PD szabályozás esetén a szabályozási rendszert egy siettetett argumentumú egyenlet írja le. Megmutattuk, hogy a végtelen sok instabil gyökkel rendelkező siettetett egyenlet a diszkretizáció hatására stabilá válhat bizonyos paramétertartományokban. Az eredményeket konferencia cikkben [28], illetve könyvfejezet formájában [29] publikáltuk.

A rúd egyensúlyozási probléma igen fontos és egyre elterjedtebb a biomechanika területén is. Hasonló modellekkel írják le az emberi egyensúlyozás folyamatát, ami az időskori egyensúlyzavarok illetve a Parkinson-kór megértését segítik. Egyensúlyozási folyamatoknál jól ismert, hogy ha a szabályozás időkésése (vagy a reflex késés emberi egyensúlyozás esetén) egy kritikus értéknél nagyobb, akkor nem lehet a rudat a felső helyzetében egyensúlyozni. Az emberi egyensúlyozásról írtunk egy összefoglaló konferencia cikket, amely az elmúlt 2 év eredményeit foglalja össze [30].

Az emberi egyensúlyozás kutatásának egyik iránya a paraméteres gerjesztés figyelembevétele, amikor a rúd felfüggesztési pontját függőlegesen rázzuk. Elkészítettük a rendszer mechanikai modelljét, és megmutattuk, hogy a paraméteres gerjesztés segít a rúd egyensúlyozásában, azaz olyan időkésés mellett, ahol a paraméteres gerjesztés nélküli rudat nem lehet stabilizálni, a paraméteresen gerjesztett rendszer stabilizálható. Az eredményekről folyóiratcikkben számoltunk be [31].

A szemi-diszkretizációs módszer fejlesztése

A szemi-diszkretizáció egy hatékony módszer késleltetést tartalmazó, periodikus együtthatójú differenciálegyenletek stabilitási vizsgálatára. A módszert a kutatócsoport 2001-ben dolgozta ki, azóta folyamatosan finomítjuk a módszert, és egyre több mérnöki problémára alkalmazzuk. A módszerről külföldi társszerzőkkel írtunk egy könyvfejezetet [32], melyben periodikus együtthatókat és periodikus időkésést tartalmazó késleltetett differenciálegyenletek stabilitásvizsgálatára alkalmazzuk a szemi-diszkretizációt.

A módszert összehasonlítottuk egy, kínai szerzők által készített teljes diszkretizációs módszerrel. Az eredményeket folyóiratcikkben publikáltuk [33]. A cikkben a két numerikus módszer konvergenciáját hasonlítjuk össze marási folyamatok esetén, és megmutatjuk, hogy a kínai szerzők által kidolgozott módszer lényegében egy speciális esete a szemi-diszkretizációnak.

A szemi-diszkretizációs módszerről és annak mérnöki alkalmazásairól Stépán Gáborral angol nyelvű szakkönyvet írtunk, amely 2011 nyarán jelent meg a Springer kiadó gondozásában [1].

Publikációk

- [1] Insperger T, Stépán G, *Semi-discretization for time-delay systems – Stability and Engineering applications*, Springer, New York, 2011, 174 pages, ISBN 978-1-4614-0334-0.
- [2] Lukács Attila, Radiális fluxusú, légréstekercses lineármotor alkalmazása mobiltelefonok mechanikai gerjesztésére, PhD értekezés, BME, 2009.
- [3] Insperger, T., Wahi, P., Colombo, A., Stépán, G., di Bernardo, M., Hogan, J.S., Full characterization of act-and-wait control for first order unstable lag processes, *Journal of Vibration and Control*, **16**(7-8) (2010), pp. 1209-1233. - IF = 0.863 (2010)
- [4] Insperger, T., Stépán, G., Brockett problem for systems with feedback delay, *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008, pp. 11491-11496 (CD-ROM).
- [5] Insperger T, Stepan G, On the dimension reduction of systems with feedback delay by act-and-wait control, *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, **27**(4) (2010), pp. 457–473. - IF = 0.213 (2010)
- [6] Insperger, T., Kovács, L.L., Galambos, P., Stépán, G., Act-and-wait concept for digital force control of robots, in *Proceedings of 17th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (RoManSy 2008)*, Tokyo, Japan, July 5-9, 2008, (Eds.: Takanishi, A., Nakamura, Y., Heimann, B, ISBN-978-4-4-906685-44-8), pp. 535-542.
- [7] Insperger, T., Kovács, L.L., Galambos, P., Stépán, G., Increasing the accuracy of digital force control process using the act-and-wait concept, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **15**(2) (2010), pp. 291-298. - IF = 2.577 (2010)
- [8] Insperger, T., Kovács, L.L., Galambos, P., Stépán, G., Act-and-wait control concept for a force control process with delayed feedback, in: *Motion and Vibration Control, Selected Papers from MOVIC 2008*, (Eds.: Ulbrich, H., Ginzinger, L.), Springer, Garching, 2009 (ISBN-13: 978-1-4020-9437-8), pp.133-142. *9th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC 2008)*, Munich, Germany, Sept. 15-18, 2008, paper no. 1173 (CD-ROM).
- [9] Insperger, T., Stepan, G., Stabilizing unstable systems by the act-and-wait concept - Case studies, *8th Workshop on Time Delay Systems (IFAC-TDS'09)*, Sinaia, Romania, September 1-3, 2009, Paper No. 29, pp. 1-5 (CD-ROM).
- [10] Ghasemi M, Zhao S, Insperger T, Kalmar-Nagy T, Act-and-wait control of discrete systems with random delays, 2012 American Control Conference (ACC), June 27 - 29, 2012, Montréal, Canada, pages 1-9, paper accepted.
- [11] Insperger, T., Stépán, G., State-dependent delay models for metal cutting processes, *First International Colloquium on Non-linear Dynamics of Deep Drilling Systems*, Liege, Belgium, 2009, March 12-13, pp. 23-28.

- [12] Bachrathy, D., Insperger, T., Stépán, G., Surface properties of the machined workpiece for helical mills, *Machine Science and Technology*, **13**(2) (2009), pp. 227-245. - IF = 0.433 (2009)
- [13] Khasawneh, F.A., Mann, B.P., Insperger, T., Stépán, G., Increased stability of low-speed turning through a distributed force and continuous delay model, *Journal of Computational and Nonlinear Mechanics*, **4**(4) (2009), Article No. 041003 (12 pages). - IF = 0.557 (2009)
- [14] Seguy, S., Insperger, T., Arnaud, L., Dessein, G., Peigné, G., Chatter suppression in milling processes using periodic spindle speed variation, *12th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, San Sebastian, Spain, May 7-8, 2009 Vol. 2, pp. 887-894 (CD-ROM).
- [15] Seguy, S., Dessein, G., Arnaud, L., Insperger, T., Chatter control by spindle speed variation in high-speed milling, *International Conference on Structural analysis of Advanced Materials (ICSAM 2009)*, Tarbes, France, September 7-10, 2009, pp. 1-10 (CD-ROM), *Advanced Materials Research*, **112** (2010), pp. 179-186.
- [16] Seguy, S., Insperger, T., Arnaud, L., Dessein, G., Peigné, G., On the stability of high-speed milling with spindle speed variation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **48**(9-12) (2010), pp. 883-895. – IF = 1,068 (2010)
- [17] Seguy, S., Insperger, T., Arnaud, L., Dessein, G., Peigné, G., Suppression of period doubling chatter in high-speed milling by spindle speed variation, *Machining Science and Technology*, **15**(2) (2011), pp. 153-171. – IF = 0,459 (2010)
- [18] Dombovari Z, Zatarain M, Insperger T, Dominant vibration frequencies in milling using semi-discretization method, *2nd International CIRP Conference on Process Machine Interaction (PMI)*, 2010, June 10-11, Vancouver, Canada, paper no. M06.
- [19] Dombovari Z, Iglesias A, Zatarain M, Insperger T, Prediction of multiple dominant chatter frequencies in milling processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **51**(6) (2011), pp. 457-464. - IF = 1,919 (2010)
- [20] Eppel, A., Insperger, T., Enikov, E., Stepan, G., Feasibility study of optical detection of chatter vibration during milling, *International Journal of Optomechatronics*, **4**(2) (2010), pp. 195-214. - IF = 0.682 (2010)
- [21] Zatarain, M., Bediaga, I., Muñoa, J., Insperger, T., Analysis of directional factors in milling: importance of multi-frequency calculation and of the inclusion of the effect of the helix angle, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **47**(5-8) (2010), pp 535-542. (Special Issue: Sp. Iss. SI) – IF = 1,068 (2010)
- [22] Lehotzky D, Insperger T, Stability of turning processes subjected to digital PD control, *Periodica Polytechnica – Mechanical Engineering*, in press (2012) – IF = 0 (2010)
- [23] Lehotzky D, Insperger T, Stability of delayed oscillators subjected to digital PD control, *10th IFAC Workshop on Time Delay Systems (IFAC-TDS 2012)*, Northeastern University, Boston, USA, June 22-24, 2012, pages 1-8, paper accepted.
- [24] Forberger, Á., Insperger, T., Ailer P., Optimization of a torsional shock absorber through the damping parameter, *Proceedings of 6th Conference on Mechanical Engineering, GÉPÉSZET 2008*, Budapest, Hungary, 2008. május 29-30, CD-ROM, 11 pages.
- [25] Forberger, Á., Filipcsei, G., Insperger, T., Zrínyi, M., Stépán, G., Application of electro-rheological fluids in adaptive dampers, in *Proceedings of the 9th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC 2008)*, Munich, Germany Sept. 15-18, 2008, paper no. 1123 (CD-ROM).
- [26] Forberger, A., Insperger, T., Determining the damper properties of damper fluids, *Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, Leoben, Ausztria, 2009-09-23/26, Book of abstracts pp. 4-5.
- [27] Insperger, T., Stepan, G., Turi, J., Delayed feedback of sampled higher derivatives, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **368** (2010), pp. 469-482. - IF = 2.457 (2010)

- [28] Insperger T, Wohlfart R, Turi J, Stepan G, Balancing using accelerometers and equations with advanced arguments, *9th IFAC Workshop on Time Delay Systems (IFAC-TDS 2010)*, Prague, Czech Republic, June 7-9, 2010, paper no. FP-IT-302.
- [29] Insperger T, Wohlfart R, Turi J, Stepan G, Equations with advanced arguments in stick balancing models, in *Time Delay Systems - Methods, Applications and New Trends*, in *Lecture Notes in Control and Information Sciences (LNCIS)*, Springer-Verlag, in press (2011).
- [30] Stepan G, Insperger T, Dynamics of quiet standing – human and robotic sensory systems to compensate delay effects, *4th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM 2010)*, 2010, December 15-18, Singapore, paper no. 243.
- [31] Insperger T, Stick balancing with reflex delay in case of parametric forcing, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **16**(4) (2011), pp. 2160-2168. - IF = 2,697 (2010)
- [32] Long, X.-H., Insperger, T., Balachandran, B., Systems with periodic coefficients and periodically varying delays: semi-discretization based stability analysis, in: *Delay Differential Equations: Recent Advances and New Directions*, (Eds.: Balachandran, B., Kalmár-Nagy, T., Gilsinn, D.), Springer, New York, 2009 (ISBN: 978-0-387-85594-3), pp. 131-153.
- [33] Insperger T, Full-discretization and semi-discretization for milling stability prediction: Some comments, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **50**(7) (2010), pp. 658-662. - IF = 1,919 (2010)