

## A KUTATÁSI TÉMA SZAKMAI ZÁRÓJELENTÉSE

**Témavezető neve: Dr. Szabó Zsolt**

**A téma címe: Időkésést tartalmazó dinamikai rendszerek stabilitása és nemlineáris rezgései**

**A kutatás időtartama: 2004-2007**

A kutatási projekt célja késleltetett dinamikai rendszerek vizsgálata volt. Ezek olyan rendszerek, melyekben bizonyos hatások késleltetve jelentkeznek, és így a rendszer mozgását/viselkedését leíró egyenlet késleltetett differenciálegyenlet. Ezeknek az egyenleteknek a fázistere végtelen dimenziós, ezért a stabilitási tulajdonságaik nem triviálisak. Ha a rendszerben paraméteres gerjesztés is jelen van, akkor a mozgásegyenletben periodikus együtthatók jelennek meg. A késleltetett periodikus egyenletek stabilitását általában nem lehet zárt alakban meghatározni, és csak közelítő módszerekkel lehet becsléseket elérni.

A kutatási projekt témáját három fő részre bonthatjuk. Az első az a periodikus és késleltetett dinamikai rendszerek stabilitásvizsgálatára kidolgozott numerikus módszerrel, az ún. szemi-diszkrétizációval kapcsolatos. Ezeket az eredményeket a másik két, alkalmazás orientált kutatásnál fel is használtuk. A második terület a szerszámgéprezgések vizsgálata. A cél olyan paramétertartományok meghatározása, amelyeknél a megmunkálás hatékonysága jelentősen növelhető. Itt az időkésés az úgynevezett regeneratív hatás miatt jelenik meg a forgácsoló szerszám és a munkadarab rezgéseit leíró egyenletekben. A harmadik terület a dinamikai rendszerek szabályozása, ahol az időkésés a szabályozott jel visszacsatolása miatt illetve digitális szabályozás esetén a mintavételezés miatt is keletkezik. Kidolgoztunk egy új szabályozási technikát, az ún. beavatkozom-és-várok szabályozási elvet.

Az eredményeket részletesen az alábbiakban ismertetjük.

### **1. Lineáris késleltetett periodikus differenciálegyenletek stabilitásvizsgálata**

Továbbfejlesztettük a szemi-diszkrétizációs módszert, amellyel késleltetett periodikus együtthatójú differenciálegyenletek stabilitási vizsgálatát lehet hatékonyan vizsgálni. A módszer lényege, hogy a szemi-diszkrétizáció során csak a késleltetett tagokat és az időfüggő együtthatókat diszkrétizáljuk, a jelen időtől függő tagokat nem, így az eredeti egyenletet közönséges autonóm differenciálegyenletek sorozatával közelítjük. Végeredményként, az eredeti végtelen dimenziós rendszert véges dimenziós diszkrét rendszerrel közelítjük. A továbbfejlesztett módszer lényege, hogy a diszkrétizálás során a késleltetett tagot két szomszédos késleltetett érték súlyozott összegeként közelítjük, ezzel a módszer hatékonysága nagymértékben javul [1]. A szemi-diszkrétizációs módszernek ezt a változatát javított 0-ad rendű közelítésnek neveztük. Az eredményeket a késleltetett Mathieu egyenlet példáján ellenőriztük. Alkalmazási példaként marási folyamatok stabilitási diagramjait határoztuk meg.

Dr. Turi János (University of Texas at Dallas) és Dr. Hartung Ferenc (Veszprémi Egyetem) matematikusokkal végzett közös munka során bebizonyítottuk a szemi-diszkrétizációs módszer konvergenciáját [2], emellett matematikai úton megmutattuk a szemi-diszkrétizáció előnyeit a teljes diszkrétizációval szemben.

A kutatási projekt utolsó két évében a módszert általánosítottuk, bevezettük a magasabb rendű szemi-diszkrétizációs eljárást, ami a differenciálegyenlet késleltetett tagjának magasabb rendű polinomokkal való közelítésén alapul. Első lépésként egy speciális esetet, a késleltetett Mathieu-egyenletet vizsgáltuk [3], majd általános alakú késleltetett és periodikus egyenleteket vizsgáltunk [4]. Megmutattuk, hogy amennyiben egy periodikus együtthatójú differenciálegyenletben a periodikus együtthatót szakaszonként állandó függvénnyel közelítjük, akkor a késleltetett tagot nem érdemes elsőrendűnél nagyobb rendben közelíteni, mert az a konvergenciát nem javítja. Amennyiben magasabb rendű közelítést szeretnénk elérni, úgy a periodikus együtthatókat is magasabb rendben kell közelíteni, pl. Magnus-sorokkal.

Nemlineáris késleltetett differenciálegyenletek periodikus pályáinak követésére dolgoztunk ki egy módszert, az ún. karakterisztikus mátrixok módszerét [5]. Ezzel az eljárással a DDD-BIFTOOL szoftverhez hasonlóan nemlineáris rendszerek bifurkáció analízisét lehet elvégezni.

## 2. Forgácsolási folyamatok vizsgálata

### 2.1. Esztergálási folyamatok mechanikai modelljének vizsgálata

A projekt első évében esztergálási folyamatok stabilitási tulajdonságainak javítási lehetőségeit vizsgáltuk abban az esetben amikor a fordulatszámot periodikusan változtatjuk bizonyos frekvenciával és amplitúdóval. A rendszert leíró időfüggő késleltetést tartalmazó késleltetett differenciálegyenlet stabilitásvizsgálatához a szemi-diszkretizációs módszer kissé átdolgozott verzióját használtuk. Meghatároztuk a rezgések során keletkező frekvenciákat. Az eredményeket a szakterületen dolgozó nemzetközileg elismert kutatók által kidolgozott módszerekkel összehasonlítottuk [6].

Megmutattuk, hogy megfelelő modell esetén az esztergálási folyamatban állapotfüggő időkésés jelenik meg, melyet autonóm állapotfüggő időkésést tartalmazó késleltetett differenciálegyenletekkel modellezhetünk. 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. A linearizált egyenlet vizsgálata során megmutattuk, hogy a (lineáris) stabilitási határok enyhe mértékben emelkednek, ha az eredeti nemlineáris modell tartalmaz állapotfüggő időkésést [7].

A regeneratív időkésés állapotfüggésének nemlineáris modelljét Dr. David Barton (University of Bristol) angol matematikussal közösen vizsgáltuk a DDE-BIFTOOL szoftvercsomag segítségével. A numerikus kódot kicsit módosítani kellett, mert a DDE-BIFTOOL csomag csak explicit állapotfüggést tartalmazó egyenlet esetén alkalmazható, az esztergálási problémában viszont az időkésést állapotfüggését egy implicit egyenlet adja. A problémát úgy oldottuk meg, hogy az időkésést egy új változóként tekintettük, és az implicit egyenletet pedig, mint egy algebrai egyenlet, hozzáadtuk a kódhoz. A numerikus elemzés érdekes eredményt adott: azt kaptuk, hogy bizonyos paraméterek mellett, főleg nagy előtolás értékeknél, a Hopf-bifurkáció szubkritikusról szuperkritikussá válik [8]. Ennek azért nagy a jelentősége, mert a szakirodalomban korábban a szerszámgéprezgéset úgy tekintették, mint tipikusan szubkritikus Hopf-bifurkáció során történő stabilitásvesztés, azaz a lineáris stabilitási határon belül bizonyos mértékű perturbáció esetén hirtelen kialakulhat nagy amplitúdójú rezgés. Szuperkritikus Hopf-bifurkáció esetén ilyen nem alakulhat ki, az átmenet a stabil és az instabil megmunkálás között "sima". Ennek elsősorban szerszámgéprezgések szabályozásánál lehet nagy jelentősége.

### 2.2. Marási folyamatok mechanikai modelljének vizsgálata

A projekt keretében belül az egyik első eredmény az esztergálási és a marási folyamatok stabilitási térképei közötti átmenet szemléletes bemutatása volt [9]. Megmutattuk, hogy amíg esztergálási folyamatok esetén a stabilitás vesztes Hopf-bifurkáción keresztül történik, marási folyamatok esetén egy új típusú stabilitási vesztes is jelentkezik, az ún. periódus kettőző vagy flip bifurkáció. Amíg Hopf-bifurkációnál kvázi-periodikus megoldások keletkeznek stabilitásvesztés esetén, addig a perióduskettőző bifurkáció esetén a keletkező rezgések periodikusak, és a periódusidő megegyezik a fogkövetési periódus kétszeresével.

Szintén a kutatási projekt első évében dolgoztuk ki a marási folyamat 2 szabadsági fokú modelljét merev szerszám és rugalmas munkadarab esetére. Ebben az esetben a lengőrendszer paraméterei a 2 szabadsági foknak megfelelő x és y irányokban lehetnek különbözőek. A rendszert leíró több dimenziós késleltetett differenciálegyenlet stabilitási tulajdonságait a szemi-diszkretizációs módszerrel vizsgáltuk. Stabilitási térképeket határoztunk meg a fordulatszám és a fogásmélység függvényében. Az x és y irányok modális paramétereinek különböző értékeit vizsgáltuk, megmutattuk, hogy a rendszerben nem lehet elhanyagolni az x és y irányok közötti forgácsoló erő okozta csatolást [10].

Részt vettünk a Dr. Janez Gradisek (University of Ljubljana) és Martin Kalveram (University of Dortmund) által 2004-ben Dortmundban végzett kísérleti munka eredményeinek értékelésben. A szlovén és a német kutatók az általunk kidolgozott szemi-diszkretizációs módszerrel meghatározott stabilitási térkép alapján végeztek méréseket különböző radiális fogásmélységű egyen- illetve

ellenirányú marás esetén. A mérések során a fordulatszám 9000 és 34000 ford/perc között mozgott, ami a mai csúcstechnológiában használt nagy sebességű megmunkálásnak felel meg. A kísérleti stabilitási térképek megegyeztek a szemi-diszkretizációval kapott térképekkel. A megmunkált felület alakhibájának elméleti és analitikus becslését is elvégeztük. A eredmények kiértékelésénél számos érdekes jelenséget megfigyeltünk, mint. pl. különböző periódusidejű pályák kialakulását, a szerszámorsó nagysebességű forgása miatt eltolódott frekvenciákat (giroszkópikus hatást), valamint az ún. stabilitási szigetek megjelenését [11-13]. Az eredményeket egy német nyelvű könyvfejezetben is megjelentettük [14].

Stabil megmunkálás esetén, a megmunkált felület alakhibája (Surface Location Error, SLE) függ a megmunkálás során keletkezett stabil, gerjesztett rezgések nagyságától. Az elméleti alakhibát a stabil megmunkálási folyamathoz tartozó közönséges differenciálegyenlet megoldásával adtuk meg. Ez alapján olyan technológiai paramétereket (fogásmélység, fordulatszám, előtolás) lehet megadni, ami egyrészt nagy hatékonyságú anyagleválasztást, másrészt kicsi felületi alakhibát okoz. Az elméleti modell alapján meghatározott és a kísérleti úton kapott alakhiba jól közelíti egymást. Megmutattuk, hogy azokban a tartományokban, ahol nagy axiális fogásmélységet lehet elérni stabil megmunkálás esetén, ez az alakhiba jelentős értékű lehet. Simító megmunkálások esetére megmutattuk, hogy milyen fordulatszám tartományokban lehet rezgésmentes megmunkálással nagy fogásmélységet és kicsi alakhibát elérni [15]. Megmutattuk, hogy a megmunkálás alakhibája ferdeélű szerszám esetén a szerszám tengelye mentén is változik, ennek a hatását térbeli ábrákon szemléltettük [16].

Az esztergáláshoz hasonlóan a maráshoz is megalkottuk az állapotfüggő időkésést tartalmazó mechanikai modellt. Ebben az esetben a mozgásegyenlet egy állapotfüggő időkésést tartalmazó periodikus késleltetett differenciálegyenlet. Marási folyamat esetén az időkésés pontos meghatározása bonyolultabb problémára vezet, mint az esztergálási folyamatnál, mivel az időkésés a rendszer állapota mellett az időtől is függ. Ezekhez a nem-autonóm állapotfüggő időkésést tartalmazó késleltetett differenciálegyenletekhez is hozzárendelhető egy lineáris egyenlet, ez azonban olyan bonyolult, hogy a lineáris stabilitási feltételt - az esztergálási modellel ellentétben - nem lehet zárt alakban megadni [17]. Ennek a témának a kulcslépése a nemlineáris egyenletekhez tartozó lineáris egyenletek megkonstruálása volt, amelyet Dr. Turi János (University of Texas at Dallas) és Dr. Hartung Ferencsel (Veszprémi Egyetem) matematikusokkal közös munkaként végeztünk el.

A marási folyamat matematikai modelljének analitikus vizsgálatával megmutattuk, a fordulatszám-fogásmélység paramétersíkon ábrázolt stabilitási térképeken a stabil tartományokban instabil szigetek, instabil lencsék keletkezhetnek bizonyos paraméterek esetén, különösen, akkor, ha a folyamat időfüggése erős [18]. Megmutattuk, hogy ez a jelenség tipikusan előfordul a nagysebességű megmunkálás tartományában. Ezeket az instabil szigeteket paraméteresen gerjesztett szigeteknek nevezhetjük, mivel egyértelműen a rendszerben jelen levő periodikus együtthatók, az ún. paraméteres gerjesztés okozza.

A 2005-ös évben a kutatócsoport egy spanyol kutatócsoporttal vette fel a kapcsolatot, melynek vezető tagjai Dr. Mikel Zatarain (Tekniker Fundazioa) és Jokin Munoa (Ideko Technological Centre). A közös munkához a magyar fél az időtartományban kidolgozott szemi-diszkretizációs módszerével járult hozzá, ami jól kiegészítette a spanyol fél által használt frekvenciatartománybeli multifrekvenciás módszert, illetve az általuk elvégzett méréseket.

A közös kutatások első lépése a ferdeélű marószerszámokkal történő megmunkálások stabilitásának vizsgálata volt. Kimutattuk, hogy ferdeélű marószerszámok esetén a fordulatszám-fogásmélység diagrammon ábrázolt stabilitási térkép szerkezete minőségileg különbözik az egyenes élű marókkal történő megmunkáláshoz képest: ún. instabil szigetek jelennek meg a stabilitási térképen. Ezek a szigetek egyértelműen a szerszámélek ferde csavarvonalú elhelyezkedése miatt keletkeznek, ezért élferdeség által okozott szigeteknek nevezhetjük őket. Fontos, hogy az élferdeség által okozott instabil szigetek minőségileg különböznek a korábban ismertetett paraméteresen gerjesztett szigetektől. Az elméleti eredményeket a spanyol fél laboratóriumában kísérletekkel is alátámasztotta. A multifrekvenciás numerikus módszerrel kapott eredményekből egy CIRP folyóirat cikk [19] született, míg a szemi-diszkretizációval történő analízis eredményeit egy konferencián mutattuk be [20].

A 2006-os év során sikeresen pályáztunk egy Magyar-Spanyol bilaterális projektre a 2007-2008-as évre, amely adminisztrációs okok miatt 2008 nyarán fog indulni. Emellett jelenleg beadás alatt áll egy EU projekt, melyet spanyol illetve francia résztvevőkkel közösen nyújtunk be 2008 májusában.

Folytattuk az együttműködést Dr. Brian Mann (Duke University) kutatócsoportjával. Marási folyamat frekvenciáit vizsgáltuk többféle marószerszám esetén figyelembe véve a szerszámélek radiális ütését. A marási folyamat stabilitási jellemzőinek meghatározásához a rezgési frekvenciák ismerete nagy segítséget nyújt, a spektrum alapján meg lehet határozni, hogy a szerszám rezgései megfelelően kicsik-e. A szerszámélek ütése azonban olyan gerjesztést okoz, ami megzavarja a spektrumot, ezáltal megnehezíti az ún. periódus kettőző stabilitási veszteség jelenségének felismerését. Megmutattuk, hogy ebben az esetben a rezgésjel Poincaré metszetét lehet használni az instabil szerszámgéprezégés azonosítására [21].

A kutatás négy éve során két leíró jellegű összefoglaló folyóirat cikk született a szerszámgéprezégés (mind esztergálás és marás) nemlineáris rezgéseivel kapcsolatban [22, 23], valamint egy könyvfejezet [24]. A projekt egyik kutatója, Szalai Róbert 2006-ban sikeresen megvédte PhD értekezését "Nagysebességű marási folyamatok nemlineáris dinamikája" címmel [25].

### 3. Késleltetéssel szabályozott rendszerek vizsgálata

Időkésést tartalmazó digitális szabályozások stabilitását vizsgáltuk az erősítési tényezők időbeni periodikus változtatása esetén. A cél a stabilitás robusztusságának növelése, és a beállási pontatlanság csökkentése volt. Többfajta periodikus változtatást kipróbáltunk, különböző periódusidőkkel. A legjobb eredményt az ún. beavatkozok-és-várok (act-and-wait) módszerrel kaptuk, melynek lényege az, hogy a szabályozó működik bizonyos időtartamig, majd kikapcsoljuk a rendszerben jelen levő időkésésnél hosszabb ideig, majd újra bekapcsoljuk stb. Ezzel a módszerrel az elméleti számítások alapján a beállási idő ötödére is csökkenhet, a beállási pontosság meg nagyságrenddel növekszik. Ezt a szabályozást, mivel időfüggő paramétert tartalmaz, nem lehet a rendszertechnika hagyományos eszközeivel kezelni, hanem a Floquet elmélet alapján kell vizsgálni. Pozíció szabályozás esetére az egy szabadsági fokú modellel kapott eredményeket konferencián mutattuk be [26]. A módszer általános, több dimenziós rendszerekre való alkalmazását illetve annak matematikai analízisét egy rangos szabályozáselméleti folyóiratban közöltük [27]. A digitális szabályozással kapcsolatos eredmények egy könyvfejezet formájában is megjelenésre kerültek [28]. A módszer hatékonyságát periodikus pályán történő robotmozgás esetére is megmutattuk [29].

A „beavatkozom-és-várok” módszert sikerrel alkalmaztuk erőszabályozási rendszerekre, ahol az elméleti eredmények a módszer kedvező tulajdonságait mutatják [30]. A módszert egy valódi roboton kísérletileg is megvalósítottuk, és megmutattuk, hogy a proporcionális erősítési tényező 8-10-szeresére növelhető a szabályozás stabilitásának elvesztése nélkül, így az erőhiba 8-10-ed részére csökkenthető. A robotos mérésekkel kapcsolatos eredményekről 2008 nyarán tartunk majd konferencia előadást [31].

A beavatkozom-és-várok módszert általános alakú idő-folytonos rendszerekre is tovább fejlesztettük. A szabályozás ki és be kapcsolgatása nélkül ezek a rendszerek végtelen dimenziósak, ezért a stabilizálási feladat, azaz a rendszer végtelen sok pólusának a megfelelő elhelyezése nem triviális feladat. A beavatkozom-és-várok módszerrel a rendszer pólusainak száma lecsökkenthető egy véges értékre, ami megegyezik a szabályozandó rendszer fázisterének a dimenziójával. Ezzel jelentős minőségi változást érünk el: a végtelen dimenziójú rendszer helyett véges dimenziójú rendszert kaptunk. A módszert először egyszerű két dimenziós késleltetett rendszerre alkalmaztuk [32], majd magasabb dimenziós rendszerekre általánosítottuk, melyeket rangos szabályozáselméleti folyóiratokban publikáltunk. Kétféle periodikus kapcsolgatást vizsgáltunk, először azt amikor a visszacsatolás erősítését zérus és állandó között változtattuk [33], majd amikor zérus és egy időfüggő függvény között kapcsolgattunk [34].

A kutatás első évében periodikus áramlások szabályozásával foglalkoztunk. A kutatási témával Haller György és Francois Lekien (MIT) foglalkoznak. Az áramtérbe két fúvókát helyeztek, amelyeken keresztül a leválási pont helyét lehet szabályozni. A szabályozás során a beavatkozás tényleges hatása

azonban kis időkéssel jelentkeznek. Ez az időkések a szabályozó stabilitásvesztéséhez vezethet, amit a szabályozó arányos tényezőjének megfelelő megválasztásával lehet kiküszöbölni. Az eredményekről konferencián tartottunk előadást [35].

A projekt során 1 illetve 2 szabadsági fokú rezgőrendszerek nemlineáris viselkedését is vizsgáltuk. Az eredményeket először általános rendszerekre fogalmaztuk meg [36], ami után mobiltelefonok rezgő hívásjelzésének vizsgálatánál alkalmaztuk [37], és egy két szabadsági fokú negyed-autó modellnél is használtuk, melyből folyóirat cikk is született [38].

### Publikációk

1. Insperger T; Stépán G: Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay, *International Journal of Numerical Methods in Engineering* 61:117-141, 2004
2. Hartung F; Insperger T; Stépán G; Turi J: Approximate stability charts for milling processes using semi-discretization, *Applied Mathematics and Computations* 174(1): 51-73, 2006
3. Insperger T; Stépán G; Turi J: Comparison of zeroth- and first-order semi-discretizations for the delayed Mathieu equation, *Proceedings of 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Bahamas, CD-ROM*, 2004
4. Insperger T; Stépán G; Turi J: On the higher-order semi-discretizations for periodic delayed systems, *Journal of Sound and Vibration* 313: 334–341, 2008
5. Szalai R; Stepan G; Hogan SJ: Continuation of bifurcations in periodic delay-differential equations using characteristic matrices, *SIAM Journal on Scientific Computing* 28: 1301-1317, 2006
6. Insperger T; Stépán G: Stability analysis of turning with periodic spindle speed modulation via semi-discretization, *Journal of Vibration and Control* 10: 1835-1855, 2004
7. Insperger T; Stépán G; Turi J: State-dependent delay in regenerative turning processes, *Nonlinear Dynamics*, 47(1-3): 275-283, 2007
8. Insperger T; Barton DAW; Stépán G: Criticality of Hopf bifurcation in state-dependent delay model of turning processes, *International Journal of Non-Linear Mechanics* 43(2): 140-149, 2008
9. Insperger T; Stépán G: Vibration frequencies in high-speed milling processes or a positive answer to Davies, Pratt, Dutterer and Burns, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126: 481-487, 2004
10. Insperger T; Stépán G: Stability transition between 1 and 2 degree-of-freedom models of milling, *Periodica Polytechnica – Mechanical Engineering* 48: 27-39, 2004
11. Govekar E; Gradisek J; Kalveram M; Insperger T; Weinert K; Stépán G; Grabec I: On stability and dynamics of milling at small radial immersion, *Annals of the CIRP* 54(1): 357-362, 2005
12. Gradisek J; Govekar E; Grabec I; Kalveram M; Weinert K; Insperger T; Stépán G: On stability prediction for low radial immersion milling, *Machine Science and Technology* 9: 117-130, 2005
13. Gradisek J; Kalveram M; Insperger T; Weinert K; Stépán G; Govekar E; Grabec I: On stability prediction for milling, *Int J Mach Tool Manuf* 45(7-8): 769-781, 2005
14. Kalveram, M., Gradisek, J., Insperger, T., Grabec, I., Stépán, G.: Vorhersage der Prozessdynamik und –stabilität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen, pp. 516-528. in Weinert K: *Fertigung*, 4. Ausgabe, Vulkan Verlag, Essen, 2005
15. Insperger T; Gradisek J; Kalveram M; Stépán G; Weinert K; Govekar E: Machine tool chatter and surface location error in milling processes, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(4): 913-920, 2006
16. Bachrathy D; Homer M; Insperger T; Stépán G: Surface location error for helical mills, *Sixth International Conference on High Speed Machining, San Sebastian, Spain (CD-ROM)*, 2007
17. Insperger T; Stépán G; Hartung F; Turi J: State dependent regenerative delay in milling processes, *Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences, Long Beach CA, paper no. DETC2005-85282 (CD-ROM)*, 2005
18. Szalai R; Stépán G: Lobes and lenses in the stability chart of interrupted turning, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* 1(3): 205-211, 2006

19. Zatarain M; Muñoa M; Peigné G; Insperger T: Analysis of the influence of mill helix angle on chatter stability, *Annals of the CIRP* 55(1): 365-368, 2006
20. Insperger T; Muñoa J; Zatarain M; Peigné G: Unstable islands in the stability chart of milling processes due to the helix angle, *CIRP - 2nd International Conference on High Performance Cutting (HPC)*, Vancouver, Canada (CD-ROM), 2006
21. Insperger T; Mann PB; Surmann T; Stépán G: On the chatter frequencies of milling processes with runout, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, in press, 2008
22. Stépán G; Szalai R; Mann BP; Bayly PV; Insperger T; Gradišek J; Govekar E: Nonlinear dynamics of high-speed milling – analyses, numerics and experiments, *Journal of Vibration and Acoustics* 127(2): 197-203, 2005.
23. Stépán G; Insperger T; Szalai R: Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes, *International Journal of Bifurcation and Chaos* 15(9): 2783–2798, 2005
24. Stépán G, Insperger T: Stability of time-periodic time-delay systems, pp. 15-22 in Michiels W; Roose D: *Time Delay Systems*, Elsevier, New York, 2005
25. Szalai R: Nonlinear dynamics of high-speed milling, PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, 2006.
26. Insperger T; Stépán G: Optimization of digital control with delay by periodic variation of the gain parameters, pp. 145-150 in *Proc. of IFAC Workshop on Periodic Control Systems*, Yokohama, Japan, 2004
27. Insperger T; Stépán G: Act-and-wait control concept for discrete-time systems with feedback delay, *IET Control Theory & Applications*, 1(3): 553-557, 2006
28. Stépán G; Insperger T: Robust time-periodic control of time-delayed systems, pp. 343-352 in Hu HY; Kreuzer E: *IUTAM Symposium on Dynamics and Control of Nonlinear Systems with Uncertainty*, Springer, Dordrecht, 2007.
29. Insperger T; Stépán G: Case study on the act-and-wait concept for the control of periodic robot motions with feedback delay, *12th IFToMM World Congress*, Besancon, France (CD-ROM), 2007
30. Insperger T; Stépán G: Act and wait concept in force controlled systems with discrete delayed feedback, *Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences*, Long Beach CA, paper no. DETC2005-85036, 2005
31. Insperger T; Kovács LL; Galambos P; Stépán G: Act-and-wait concept for digital force control of robots, in *Proceedings of 15th CISM-IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control*, Tokio, Japan, (CD-ROM), 2008
32. Insperger T; Stépán G: Act and wait control - case study of a double integrator with delayed feedback, *6th European Solid Mechanics Conference*, Budapest, Hungary (CD-ROM), 2006
33. Insperger T: Act-and-wait concept for time-continuous control systems with feedback delay, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 14(5): 974-977, 2006
34. Stépán G; Insperger T: Stability of time-periodic and delayed systems - a route to act-and-wait control, *Annual Reviews in Control* 30: 159-168, 2006
35. Insperger T; Lekien F; Salman H; Haller G; Stépán G: Control of separation point in periodic flows including delay effects, pp. 451-455 in *Proc. of IFAC Workshop on Periodic Control Systems*, Yokohama, Japan, 2004
36. Szabó Zs; Lukács A: Qualifying of bell- and disc-rotor motors on the basis of resonance curve, in *Proceedings of 5th Conference on Mechanical Engineering GÉPÉSZET 2006*, Budapest, Hungary (CD-ROM), 2006
37. Lukács A; Szabó Zs: Isolating effect of textile materials on vibration motors used for mobile phones, *6th European Solid Mechanics Conference*, Budapest, Hungary (CD-ROM), 2006
38. Szabó Zs; Lukács A: Numerical stability analysis of a forced two-d.o.f. oscillator with bilinear damping, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2(3): 211-217, 2007