

dc_852_14

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE

**VÁLTOZÓ IDŐKÉSÉST TARTALMAZÓ GÉPÉSZETI
RENDSZEREK STABILITÁSA**

Írta:

Insperger Tamás

aki a Magyar Tudományos Akadémia doktora

cím elnyerésére pályázik

Budapest, 2014

1. Tudományos feladat ismertetése

Sok gépészeti probléma matematikai megfogalmazása történik késleltetett differenciálegyenletek segítségével. Késleltetett differenciálegyenleteken olyan egyenleteket értünk, melyek az állapotváltozó jelen időpontbeli értékei mellett korábbi időpontbeli értékeit is tartalmazzák. Ilyen rendszerek például a visszacsatolási időkést (holtidőt) tartalmazó szabályozások, ahol a szabályozó a beavatkozó jelet a rendszer korábbi állapotváltozói alapján határozza meg. Ebben az esetben az időkést az információ továbbításának és feldolgozásának véges sebességéből, valamint, digitális szabályozás esetén, a szabályozó mintavételezéséből adódik [22, 17, 9]. Forgalmi dugók kialakulását is gyakran modellezik késleltetett differenciálegyenletekkel. Ezek a modellek az egymást követő autók fékezésénél illetve gyorsításánál veszik figyelembe a vezetők reflexkésését [14]. A mechanikai rendszer önmaga is okozhat időkést, erre példa a forgácsolási folyamatok során kialakuló regeneratív szerszámgéprezgés [21, 20, 18, 1]. Esztergálás esetén az eltávolított forgács vastagsága és, következésképpen, a szerszámra ható forgácsolóerő függ a szerszám jelenlegi (t időpontbeli) és egy korábbi ($t-\tau$ időpontbeli) helyzetétől, ahol τ a munkadarab egyszeri körbefordulásának ideje. A szerszám és a munkadarab rezgéseit leíró mozgásegyenletben így késleltetett argumentumú tagok is megjelennek. Marás esetén ez a regeneratív hatás szintén jelentkezik, de ott a τ időkést a szerszám fogkövetési periódusával egyenlő [12, 2]. Kerekek gördülésének pontosabb modelljei is késleltetett differenciálegyenletekre vezetnek, ahol az időkést a rugalmas gumibroncs talajjal érintkező (letapadt) szakaszának hosszával arányos [19].

Ellentétben a közönséges differenciálegyenletekkel, a késleltetett differenciálegyenletek általában végtelen dimenziós fázistérben reprezentálhatók [13, 5, 3]. Következésképp a lokális stabilitási tulajdonságok meghatározásához egy végtelen dimenziós sajátérték-problémát kell megoldani. Lineáris autonóm késleltetett differenciálegyenletek esetében a stabilitásvizsgálat általában analitikusan is elvégezhető [8, 18, 11], de a legtöbb periodikus késleltetett differenciálegyenlet stabilitása csak közelítő numerikus módszerekkel határozható meg [10, S1].

Sok dinamikai folyamatot nem lehet leírni állandó időkést tartalmazó modellel. Ilyenek például az interneten keresztül történő szabályozások, ahol az időkést az adott pillanatban belépett felhasználók számától, illetve a számítógépes kapacitástól függ. Forgalmi dugók modelljeinél a vezetők reakcióideje is függhet a követési távolságtól: ha kicsi a követési távolság, akkor kisebb a reakció idő (azaz éberebbek a vezetők). Változó fordulatszámú forgácsolási folyamatok modelljei is változó időkést tartalmazó egyenletekre vezetnek. Ebben az esetben a fordulatszám változtatásának a célja éppen a regeneratív időkést időbeli változtatása, perturbálása [16]. Ha az időkést változása egyértelműen leírható egy $\tau(t)$ az időfüggvénnyel, akkor paraméteresen gerjesztett időkéstéről beszélünk. Ha a $\tau(t)$ függvény periodikus, akkor a rendszert egy periodikus késleltetett differenciálegyenlet írja le, amelyet a végtelen dimenziós Floquet-elmélet segítségével vizsgálhatunk [4]. Ez a jelenség hasonló a paraméteresen gerjesztett inverz ingához, csak a paraméteres gerjesztés itt az állapotváltozó argumentumában, az időkéstében jelentkezik. Paraméteresen gerjesztett időkéstésre példa a változó fordulatszámú esztergálás illetve marás, de a mintavételezéses szabályozásokat is lehet modellezni időben szakaszonként lineárisan változó időkésttel. Másik fajtája a változó időkésteknek az állapotfüggő időkést, amikor az időkést változását a rendszert leíró állapotváltozók határozzák meg, pl. $\tau(x(t))$, ahol $x(t)$ a rendszert leíró valamely állapotváltozó [7]. Az állapotfüggő időkést tartalmazó

egyenletek mindig nemlineárisak, mivel az állapotváltozó megjelentik a saját argumentumában az időkézésen keresztül, vizsgálatuk ezért speciális eszközöket igényel [6].

Az értekezés témája változó időkézést tartalmazó gépészeti rendszerek stabilitásvizsgálata. Az értekezés egy matematikai áttekintéssel kezdődik, ahol késleltetett differenciálegyenletek néhány speciális osztályának stabilitási kritériumait foglalom össze. Ezután egy lineáris periodikus késleltetett differenciálegyenletek stabilitásvizsgálatára alkalmas módszernek, az ún. szemi-diszkretizációs módszernek, ismertetem egy magasabb rendű változatát, amelyhez hibabecslést is adok. Ez adja az értekezés első tézisét. Majd számgéprezés területéről vizsgálom két példát. Az első egy esztergálási folyamat két szabadsági fokú modellje, ami egy állapotfüggő időkézést tartalmazó késleltetett differenciálegyenletre vezet. Az értekezés második tézise ennek a modellnek stabilitásvizsgálatával foglalkozik. A másik példa egy váltakozó fordulatszámú marási folyamat. Ha a fordulatszám változtatás periódusidejének és az átlagos regeneratív időkézésnek a hányadosa racionális szám, akkor ez a modell egy periodikus időkézést tartalmazó késleltetett differenciálegyenletre vezet. A harmadik tézis a modell stabilitási tulajdonságaival foglalkozik. Ezután visszacsatolási időkézést tartalmazó szabályozási rendszerekre ismertetek egy új szabályozási módszert, a beavatkozom-és-várok szabályozást. A módszer lényege az, hogy a visszacsatolt jelet időben periodikusan le- és felkapcsolgatjuk úgy, hogy a kikapcsolási (várakozási) idő nagyobb, mint az időkézés. A módszer hatékonyságát egy rúdegyensúlyozási problémával demonstrálok. Az értekezés negyedik tézise a beavatkozom-és-várok szabályozási módszer tulajdonságaival foglalkozik. Végül egy késleltetést tartalmazó erőszabályozású robotot vizsgálom. Megmutatom, hogy a szabályozás során kialakuló erőhiba jelentősen csökkenthető a beavatkozom-és-várok módszerrel. Az elméleti eredményeket mérésekkel is igazolom. Ez adja az értekezés ötödik tézisét.

2. Vizsgálati módszerek

A kutatómunka célja különböző gépészeti alkalmazásokban felmerülő, változó időkézést tartalmazó mechanikai modellek stabilitásvizsgálata volt. A vizsgálat lépései: (1) mechanikai modellalkotás; (2) a matematikai modell (nemlineáris késleltetett differenciálegyenlet) felállítása; (3) az állandósult pálya körüli linearizált egyenlet meghatározása; (4) a linearizált rendszer stabilitásvizsgálata. A mechanikai modellalkotás során a célom az volt, hogy azt a lehető legegyszerűbb, legkevesebb paramétert tartalmazó modellt használjam, amely a probléma szempontjából lényeges tulajdonságokat tartalmazza. A matematikai modell felírását a dinamika alaptétele alapján végeztem. Az esztergálási folyamatot leíró állapotfüggő időkézést tartalmazó késleltetett differenciálegyenlet vizsgálata során a linearizálást a Hartung Ferenc és Turi János által kidolgozott módszer alapján végeztem el [6]. Az így kapott linearizált egyenlet egy autonóm késleltetett differenciálegyenlet, amelynek stabilitási tulajdonságait a szakirodalomból ismert D-felosztás (D-subdivision) módszerrel vizsgáltam [8, 18]. A váltakozó fordulatszámú marás, az egyensúlyozás és az erőszabályozási folyamat esetén a mozgásegyenlet egy állandó vagy időben periodikusan változó időkézést tartalmazó differenciálegyenlet volt. Ezeknél a modelleknél a vizsgálni kívánt állandósult mozgáshoz tartozó variációs rendszert a szakirodalomból ismert lineárizálási technikákkal határoztam meg [5, 18]. A váltakozó fordulatszámú marást leíró modell esetén a linearizált mozgásegyenlet egy periodikus időkézést tartalmazó periodikus késleltetett differenciálegyenlet volt. A beavatkozom-és-várok szabályozási elv alkalmazásainál

(egyensúlyozás illetve erőszabályozás) a mozgásegyenlet egy állandó időkétséget tartalmazó periodikus késleltetett differenciálegyenlet volt. Ezeknek a rendszereknek a stabilitásvizsgálatára az elsőrendű szemi-diszkretizációs módszert használtam, amellyel az értekezés első tézise foglalkozik. A beavatkozom-és-várok szabályozási elv azon eseteinél, amikor a várakozási idő nagyobb volt, mint az időkétséget, a stabilitásvizsgálatot az értekezés 6. fejezetében levezetett zárt alakú monodromi mátrix sajátértékeinek vizsgálatával végeztem el. A numerikus számításokat Matlab programmal végeztem, az algebrai levezetéseket részben kézi számításokkal, részben Maple program segítségével végeztem.

Az értekezés két mérési eredményt tartalmaz. Az első mérés váltakozó fordulatszámú marási folyamatokkal kapcsolatos. Ezt a mérést Sebastien Seguy (École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Franciaország, Tarbes) végezte közös kutatási projekt keretében Franciaországban. A közös projekt célja a váltakozó fordulatszámú marási folyamatok stabilitási diagramjainak meghatározása illetve a váltakozó fordulatszámmal való stabilizálásnak kísérleti igazolása volt. A mérések Sebastien Seguy PhD kutatásainak a részét képezték [15], ezért a mérési eredményeket nem foglaltam bele a tézisbe. A mérések leírását és az eredményeket az értekezésben egy külön fejezetben ismertettem a kutatási projekt során készített közös publikációk alapján (ld. [S14, S15]). A másik mérés a beavatkozom-és-várok szabályozási elv alkalmazása volt erőszabályozási folyamatokra. A mérést a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszékének laborjában található HIRATA roboton végeztük el Kovács László kollégámmal. A mérés során különböző értékre beállított időkétséget mellett folyamatosan növeltük a szabályozás arányos erősítési tényezőjét egészen addig, amíg a rendszer elvesztette stabilitását. A robotkar programozásában Galambos Péter és Juhász András segített.

3. Új tudományos eredmények

1. Tézis

Kidolgoztam a magasabb rendű szemi-diszkretizációs numerikus módszert, amely lineáris periodikus késleltetett differenciálegyenletek stabilitásvizsgálatára alkalmas. A módszer lényege hogy a periodikus együtthatókat és a periodikus időkétséget szakaszonként állandó függvénnyel közelítjük, a késleltetett tagokat magasabb rendű polinomokkal közelítjük, míg a többi tagot változatlanul hagyjuk.

Megmutattam, hogy nulladrendű közelítés esetén az egy diszkrét időlépés alatt keletkező közelítési hiba arányos az időlépés négyzetével, míg az elsőrendű közelítésnél, ez a hiba az időlépés köbével arányos. Minden magasabb rendű közelítésnél, a hiba továbbra is az időlépés köbével arányos, amennyiben a periodikus együtthatókat és a periodikus időkétséget szakaszonként állandó függvénnyel közelítjük.

A tézissel kapcsolatos eredményeket az [S1, S6] publikációk tartalmazzák, míg a tézis eredményeinek alkalmazása speciális problémákra a [S8, S12] publikációkban található.

2. Tézis

Ortogonalis esztergálási folyamatok két szabadsági fokú modelljét vizsgáltam. Megmutattam, hogy ha a szerszám és a munkadarab közötti relatív rezgéseket is figyelembe vesszük a modellben, akkor a mozgásegyenlet egy állapotfüggő időkétséget tartalmazó késleltetett differenciálegyenlet lesz.

Meghatároztam a szerszám állandó deformációja mellett kialakuló állandósult állapothoz tartozó lineáris egyenletet. Megmutattam, hogy az így kapott linearizált egyenlet különbözik az esztergálási folyamatok hagyományos modelljeit leíró állandó időkésést tartalmazó késleltetett differenciálegyenletektől: egy új tag jelenik meg az egyenletben, aminek az oka az, hogy a forgácsoló erő explicit módon függ az állapotfüggő időkéséstől.

Meghatároztam az állapotfüggő időkésést tartalmazó modell stabilitási térképét a fordulatszám és a fogásmélység függvényében. Megmutattam, hogy az állapotfüggő időkésést tartalmazó modell stabilitási határai kicsit magasabban vannak, mint az állandó időkésést tartalmazó modell stabilitási határai.

A tézissel kapcsolatos eredményeket az [S5, S17] publikációk tartalmazzák. Az értekezésben bemutatott modell nemlineáris vizsgálatát a [S7] publikáció tartalmazza. Marási folyamat állapotfüggő időkésést tartalmazó modelljének hasonló vizsgálatával az [S18] publikáció foglalkozik.

3. Tézis

Megadtam a váltakozó fordulatszámú marási folyamatok egy szabadsági fokú modelljének linearizált mozgásegyenletét a következő feltételek mellett: (1) a fordulatszám változtatás periódusidejének és az átlagos regeneratív időkésésnek a hányadosa racionális szám; és (2) a szerszám csak kis rezgéseket végez az átlagos fogankénti eltoláshoz képest.

Az elsőrendű szemi-diszkrétizációs módszer segítségével meghatároztam a stabilitási térképet az átlagos fordulatszám és a fogásmélység függvényében. Megmutattam, hogy nagy fordulatszámok esetén a fordulatszám változtatás nem eredményez jelentős javulást a stabilitásban, csak az első periódus kettőző stabilitási görbe határán tapasztalható enyhe javulás, ahol stabilitási görbék új sorozata jelenik meg. Kisebb fordulatszámok esetén a fordulatszám változtatás hatására a stabilitási határok magasabb fogásmélység értékeknél helyezkednek el.

A tézissel kapcsolatos eredményeket az [S1] publikáció tartalmazza. Az értekezésben bemutatott mérések leírását a [S14, S15, S22] publikációk tartalmazzák.

4. Tézis

Bevezettem a beavatkozom-és-várok szabályozási módszert folytonos idejű visszacsatolási időkésést tartalmazó rendszerekre úgy, hogy a visszacsatolt jelet időben periodikusan le- és felkapcsolgatjuk. Megmutattam, hogy ha a kikapcsolási (vagy várakozási) idő nagyobb, mint az időkésés, akkor a rendszert le lehet írni egy n dimenziós diszkrét leképezéssel, ahol n a késleltetés nélküli rendszer rendje. Következésképp, a szabályozó tervezésénél csak n karakterisztikus multiplikatort kell figyelni, szemben a folytonosan visszacsatolt rendszer végtelen sok karakterisztikus gyökével.

Mintapéldaként egy rúdegyensúlyozási problémát vizsgáltam a reflexkésés figyelembevételével. A megfelelő modell egy visszacsatolási időkésést tartalmazó PD szabályozó volt. Megmutattam, hogy a beavatkozom-és-várok szabályozási módszerrel olyan nagy időkésések esetén is lehet a rudat egyensúlyozni, amelyeknél az időben állandó PD szabályozóval már nem lehet stabilis szabályozást megvalósítani.

A tézissel kapcsolatos eredményeket az [S1, S3] publikációk tartalmazzák. A beavatkozom-és-várok rendszerrel kapcsolatos további vizsgálatokat folytonos idejű rendszerekre a [S16,

S20, S21, S9, S11] publikációk tartalmazzák, míg diszkrét idejű rendszerekkel a [S4, S13] publikációk foglalkoznak.

5. Tézis

A beavatkozom-és-várok szabályozási módszert alkalmaztam egy visszacsatolási időkésést tartalmazó erőszabályozási folyamatra, és az eredményeket összehasonlítottam a hagyományos, folyamatos visszacsatolást tartalmazó szabályozással. Meghatároztam a stabilitási térképeket, amelyek a visszacsatolási időkésés függvényében mutatják azokat a kritikus arányos erősítési tényezőket, amelyeknél a rendszer elveszíti stabilitását. Megmutattam, hogy a beavatkozom-és-várok szabályozási elv alkalmazása esetén nagyobb arányos erősítési tényezőt lehet alkalmazni stabilitásvesztés nélkül. Mivel az erőhiba csökken az arányos erősítési tényező növelésével, az erőszabályozási folyamat pontosságát jelentősen növelni lehet a beavatkozom-és-várok szabályozási elv alkalmazásával.

Az elméleti eredményeket kísérlettel igazoltam több visszacsatolási időkésés esetén is. A modell verifikálására a stabilitáshatáron keletkező rezgések frekvenciáját használtam. Az elméleti úton levezetett frekvenciák jó egyezést mutattak a méréssel meghatározott spektrummal. A mérések megerősítették azt, hogy a beavatkozom-és-várok szabályozási elv segítségével 2-3-szor nagyobb arányos erősítési tényezőt lehet alkalmazni stabilitásvesztés nélkül. A mérések azt is megerősítették, hogy az erőhibát jelentősen csökkenteni lehet a beavatkozom-és-várok szabályozási elv alkalmazásával.

A tézissel kapcsolatos eredményeket az [S1, S2] publikációk tartalmazzák. Digitális szabályozással megvalósított erőszabályozási folyamatok hasonló vizsgálatával a [S10, S19] publikációk foglalkoznak.

4. Az értekezés témaköréből írt publikációk jegyzéke

Csak az értekezés témaköréhez szorosan kapcsolódó publikációkat sorolom fel.

Könyv, könyvfejezet

- [S1] Insperger T, Stépán G (2011) Semi-discretization for time-delay systems. Springer, New York.
- [S2] Insperger T, Kovacs LL, Galambos P, Stépán G (2009) Act-and-wait control concept for a force control process with delayed feedback. In: Ulbrich H, Ginzinger L (eds) Motion and vibration control, Springer, Garching.

Folyóirat cikkek

- [S3] Insperger T (2006) Act and wait concept for time-continuous control systems with feedback delay. IEEE T Contr Syst T 14:974–977. (IF=1,211)
- [S4] Insperger T, Stépán G (2007) Act-and-wait control concept for discrete-time systems with feedback delay. IET Control Theory A 1:553–557. (IF=1,045)
- [S5] Insperger T, Stépán G, Turi J (2007) State-dependent delay in regenerative turning processes. Nonlinear Dynam 47:275–283. (IF=1,045)
- [S6] Insperger T, Stépán G, Turi J (2008) On the higher-order semi-discretizations for periodic delayed systems. J Sound Vib 313:334–341. (IF=1,364)

- [S7] Insperger T, Barton DAW, Stépán G (2008) Criticality of Hopf bifurcation in state-dependent delay model of turning processes. *Int J Nonlin Mech* 43:140–149. (IF=1,296)
- [S8] Insperger T (2010) Full-discretization and semi-discretization for milling stability prediction: Some comments. *Int J Mach Tool Manu* 50:658–662. (IF=1,919)
- [S9] Insperger T, Stépán G (2010) On the dimension reduction of systems with feedback delay by act-and-wait control. *IMA J Math Control I* 27, 457–473. (IF=0,213)
- [S10] Insperger T, Kovacs LL, Galambos P, Stépán G (2010) Increasing the accuracy of digital force control process using the act-and-wait concept. *IEEE-ASME T Mech* 15:291–298. (IF=2,577)
- [S11] Insperger T, Wahi P, Colombo A, Stépán G, di Bernardo M, Hogan JS (2010) Full characterization of act-and-wait control for first order unstable lag processes. *J Vib Control* 16(7-8):1209–1233. (IF=0,863)
- [S12] Insperger T (2011) Stick balancing with reflex delay in case of parametric forcing. *Commun Nonlinear Sci* 16(4):2160–2168. (IF=2,697)
- [S13] Insperger T, Milton J (2014) Sensory uncertainty and stick balancing at the fingertip. *Biol Cybern* 108(1):85–101. (IF=2,067)
- [S14] Seguy S, Insperger T, Arnaud L, Dessein G, Peigné G (2010) On the stability of high-speed milling with spindle speed variation. *Int J Adv Manuf Tech* 48:883–895. (IF=1,068)
- [S15] Seguy S, Insperger T, Arnaud L, Dessein G, Peigné G (2011) Suppression of period doubling chatter in high-speed milling by spindle speed variation. *Mach Sci Technol* 15(2):153–171. (IF=0,459)
- [S16] Stépán G, Insperger T (2006) Stability of time-periodic and delayed systems – a route to act-and-wait control. *Annu Rev Control* 30:159–168. (IF=0,822)

Cikkek lektorált konferencia kiadványokban

- [S17] Insperger T, Stépán G, Turi J (2005) State-dependent delay model for regenerative cutting processes. *Fifth EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2005)*, Eindhoven, The Netherlands, pp. 1124-1129.
- [S18] Insperger T, Stépán G, Hartung F, Turi J (2005) State-dependent regenerative delay in milling processes. *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences*, Long Beach, USA, DETC2005-85282.
- [S19] Insperger T, Stépán G (2005) Act and wait concept in force controlled systems with discrete delayed feedback. *ASME International Design Engineering Technical Conferences*, Long Beach, USA, paper no. DETC2005-85036 (CD-ROM).
- [S20] Insperger T, Stépán G (2008) Brockett problem for systems with feedback delay. *17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, pp. 11491-11496 (CD-ROM).
- [S21] Insperger T, Stépán G (2009) Stabilizing unstable systems by the act-and-wait concept - Case studies. *8th Workshop on Time Delay Systems (IFAC-TDS'09)*, Sinaia, Romania, paper no. 29 (CD-ROM).
- [S22] Seguy S, Insperger T, Arnaud L, Dessein G, Peigné G (2009) Chatter suppression in milling processes using periodic spindle speed variation. *12th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, San Sebastian, Spain, Vol. 2, pp. 887-894 (CD-ROM).

A PhD fokozat megszerzése óta összesen 91 közleményem jelent meg, ebből 38 folyóiratcikk ($\Sigma IF=44,45$), 7 könyvfejezet és 46 konferenciatickk.

5. A csatlakozó szakirodalom legfontosabb közleményei

- [1] Altintas Y (2000) Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. Cambridge University Press, New York.
- [2] Altintas Y, Budak E (1995) Analytical prediction of stability lobes in milling. CIRP Ann–Manuf Techn 44:357–362.
- [3] Bellman R, Cooke K (1963) Differential-difference equations. Academic Press, New York.
- [4] Farkas M (1994) Periodic motions. Springer-Verlag, New York.
- [5] Hale JK (1977) Theory of functional differential equations. Springer-Verlag, New York.
- [6] Hartung F, Turi J (2000) Linearized stability in functional-differential equations with state-dependent delays. Proceedings of the Conference Dynamical Systems and Differential Equations, added volume of Discrete and Continuous Dynamical Systems, pp. 416–425.
- [7] Hartung F, Krisztin T, Walther H-O, Wu J (2006) Functional differential equations with state-dependent delays: theory and applications. In: Cañada A, Drábek P, Fonda A (eds) Handbook of Differential Equations, Ordinary Differential Equations, Elsevier, North-Holland.
- [8] Kolmanovskii VB, Nosov VR (1986) Stability of functional differential equations. Academic Press, London.
- [9] Kuo BC (1977) Digital Control Systems. SRL Publishing Company, Champaign.
- [10] Mann BP, Patel BR (2010) Stability of delay equations written as state space models. J Vib Control 16:1067–1085.
- [11] Michiels W, Niculescu S-I (2007) Stability and stabilization of time-delay systems: an eigenvalue-based approach. SIAM Publications, Philadelphia.
- [12] Minis I, Yanushevsky R (1993) A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling. J Eng Ind–T ASME 115:1–8.
- [13] Myshkis AD (1955) Lineare Differentialgleichungen mit nacheilendem Argument. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- [14] Orosz G, Stépán G (2006) Subcritical Hopf bifurcations in a car-following model with reaction-time delay. P Roy Soc A–Math Phys 462:2643–2670.
- [15] Seguy S, (2008) From the spindle speed selection to the spindle speed variation for chatter control in thin wall milling: modelling and experiments, PhD Thesis, École Nationale d’Ingénieurs de Tarbes, France.
- [16] Sexton JS, Milne RD, Stone BJ (1977) A stability analysis of single point machining with varying spindle speed. Appl Math Model 1:310–318.
- [17] Smith OJM (1958) Feedback control systems, McGraw-Hill Series in Control Systems Engineering. McGraw-Hill, New York.
- [18] Stépán G (1989) Retarded dynamical systems. Longman, Harlow.
- [19] Stepan G (1998) Delay, nonlinear oscillations and shimmying wheels. In: Moon FC (ed) Applications of nonlinear and chaotic dynamics in mechanics, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- [20] Tlustý J, Poláček A, Danek C, Spacek J (1962) Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [21] Tobias SA, Fishwick, W (1958) Theory of regenerative machine tool chatter. The Engineer, Feb. 199–203, 238–239.
- [22] Tsyppkin YaZ (1946) The systems with delayed feedback. Avtomatika i Telemekhanika 7:107–129.