



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Műszaki Mechanikai Tanszék

Tézisfüzet

a Gépészeti Tudományok PhD programban benyújtott

Változó időkést tartalmazó dinamikai rendszerek mérnöki alkalmazásokban

című doktori disszertációhoz

Szerző:

Molnár Tamás Gábor

Témavezető:

Dr. Insperger Tamás

egyetemi docens
Műszaki Mechanikai Tanszék

Budapest, 2018

A disszertáció áttekintése

Ez a dolgozat olyan mérnöki rendszerekkel foglalkozik, amelyekben az időkéésés jelentős szerepet játszik. Az időkéésést tartalmazó (holtidős) dinamikai rendszerek vizsgálata fontos feladat a mérnöki tudományokban, mivel az időkéésés gyakran okoz nem kívánt rezgéseket. A dolgozatban olyan mérnöki alkalmazásokat mutatok be, ahol különböző típusú időkéésések jelennek meg: pont (diszkrét) és megoszló időkéésés, amelyek lehetnek állandóak, időben változóak, vagy állapotfüggők. A bemutatott mérnöki alkalmazások közt egyaránt előfordulnak lineáris és nemlineáris, illetve autonóm és időben periodikus dinamikai rendszerek. Annak ellenére, hogy a vizsgált mérnöki rendszerek fizikai háttere különböző, a matematikai leírásuk és vizsgálatuk nagyon hasonló.

Az első mérnöki alkalmazás az instabil (labilis) rendszerek stabilizálása visszacsatolásos szabályozóval, ahol a visszacsatolás során elkerülhetetlenül megjelenik az időkéésés. Az időkéésés destabilizáló hatásának megszüntetésére egy lehetséges módszer a prediktív szabályozási eljárások alkalmazása. Ezek közül az ún. véges spektrum hozzárendelést mutatom be egy inverz inga stabilizálásának példáján keresztül. Az inverz inga modelljét gyakran használják az emberi egyensúlyozás és mozgásszabályozás megértéséhez, ahol az emberi reakció késés fontos befolyásoló tényező. A szabályozási kört leíró, pont és megoszló időkéésést tartalmazó egyenlet vizsgálatával bemutatható, hogy a véges spektrum hozzárendelés képes nagy időkéésés esetén is stabilizálni egy instabil rendszert, ha arról egy kellően pontos belső modell áll rendelkezésre (1. tézis).

A második alkalmazás a közlekedési rendszerek és az autonóm járművek időkééséses dinamikája. A vizsgált modellben a közlekedés résztvevői vezeték nélküli kommunikáció segítségével mozgásukról adatokat küldenek egymásnak. Ezáltal a járművek mozgása úgy szabályozható, hogy a közlekedés biztonsága és a forgalom áteresztő képessége javul. A szabályozás digitális jellege miatt periodikus időkéésés jelenik meg a járművek szabályozá-

si körében. Bemutatom az időkésés biztonságra és forgalomra gyakorolt negatív hatását, amely prediktív szabályozási eljárást alkalmazva kiküszöbölhető (2. tézis).

A dolgozat hátralevő részének témája a forgácsolási folyamatok során fellépő ún. regeneratív szerszámgéprezgések. Először esztergálási folyamatokat vizsgálok. A központi téma egy nemlineáris dinamikai jelenség vizsgálata: létezik egy ún. bistabil tartomány a technológiai paraméterek terében, ahol stabil megmunkálás és nagy amplitúdójú szerszámgéprezgések egyaránt előfordulhatnak a rendszert érő zavarásoktól függően. Gyakorlati szempontból ez a tartomány nem megbízható és kerülni kell a megmunkálási folyamat paramétereinek megválasztásakor. A leíró nemlineáris, pont időkéséses dinamikai rendszer vizsgálatával egy egyszerű zárt alakú formulát vezetek be, amellyel a meg lehet határozni bistabil tartományt (3. tézis).

Ezután alacsony fordulatszámú esztergálási folyamatok vizsgálata következik, ahol kifinomultabb forgácsolóerő modellek szükségesek a szerszámgéprezgések előrejelzéséhez. Egy megoszló forgácsolóerő modell segítségével, a leíró állandó és állapotfüggő megoszló időkéséses egyenletek vizsgálatán keresztül meghatározom a bistabil paramétertartományt (4. tézis).

Végül alacsony fordulatszámú marási folyamatokat vizsgálok. A gyakorlatban ismert, hogy alacsony fordulatszám esetén magasabb axiális fogásmélység értékek mellett sem alakulnak ki szerszámgéprezgések. Ennek a jelenségnek a magyarázata a dolgozat utolsó témája. Először egy, a vágási irány rezgésektől való függését figyelembe vevő forgácsolóerő modellt mutatok be. A leíró periodikus együtthatójú időkéséses rendszer vizsgálatával megmutatom, hogy ez a modell nem minden esetben magyarázza meg a stabil paramétertartomány növekedését alacsony fordulatszámon (5. tézis). Majd egy megoszló forgácsolóerő modellt vezetek be marás esetére. Ez időben periodikus megoszló időkéséses egyenletre vezet, amelynek segítségével magyarázható a stabil paramétertartomány növekedése alacsony fordulatszámon (6. tézis).

1. Tézis

Megvizsgáltam az ún. véges spektrum hozzárendeléses prediktív szabályozási eljárást, különös tekintettel a predikcióhoz használt belső modell paramétereinek bizonytalanságára és a szabályozó egyenlet megvalósítási pontatlanságaira. Megvizsgáltam az inverz inga stabilizálási problémáját visszacsatolási időkézés jelenlétében. Kiszámítottam a leíró megoszló időkézéses egyenlet stabilitási térképeit, amelyek megmutatják a szabályozó paraméterek terében az ideálisan, elméletileg és robusztusan stabil tartományokat a belső modell különböző mértékű paraméterbizonytalanságai esetén. Ez alapján kimondható a következő tézis.

Az alábbi állítások teljesülnek a

$$\ddot{\varphi}(t) - a\varphi(t) = u(t - \tau)$$

másodrendű, bemeneti időkézéssel rendelkező dinamikai rendszer véges spektrum hozzárendeléses prediktív szabályozási eljárással történő stabilizálása esetén, ha a szabályozást digitális szabályozó valósítja meg kellően kis mintavételezési idővel.

A véges spektrum hozzárendelés érzékeny a predikcióhoz használt belső modell és a valós rendszer paramétereinek közötti eltérésekre. Jelölje ε_τ a τ visszacsatolási időkézés és ε_a az $a > 0$ rendszerparaméter becslésének hibáját. Legyen továbbá a_{crit} az a rendszerparaméter kritikus értékre, amelyre teljesül, hogy adott időkézés mellett $a > a_{\text{crit}}$ esetén a rendszer nem stabilizálható. Ha a belső modell megegyezik a valós rendszerrel ($\varepsilon_\tau = 0$, $\varepsilon_a = 0$), akkor a véges spektrum hozzárendelés lehetővé teszi a stabilizálást tetszőlegesen nagy a rendszerparaméter esetén. A belső modell kis paraméterbizonytalanságai esetén a következő tulajdonságok érvényesek az $\varepsilon_a = 0$ speciális eset numerikus vizsgálata alapján. A véges spektrum hozzárendelés az a_{crit} kritikus rendszerparaméter tekintetében felülmúlja a hagyományos

arányos-differenciáló (PD) és arányos-differenciáló-gyorsulás (PDA) szabályozókat. Azaz, ha a paraméterbizonytalanságok értéke kisebb, mint 25% ($\varepsilon_\tau < 0,25$), akkor az a_{crit} kritikus érték nagyobb a véges spektrum hozzárendelés esetén, mint a PD szabályozót alkalmazva. Ha a paraméterbizonytalanságok értéke kisebb, mint 8% ($\varepsilon_\tau < 0,08$), akkor az a_{crit} kritikus érték nagyobb a véges spektrum hozzárendelés esetén, mint a PDA szabályozót alkalmazva.

Kapcsolódó publikációk: [1, 2].

2. Tézis

Megvizsgáltam egy azonos sávban haladó járműcsoport mozgását, ahol a járművek vezeték nélküli kommunikáció segítségével adatokat küldenek egymásnak és ez alapján szabályozzák mozgásukat. Megvizsgáltam a szabályozási körökben fellépő időben periodikus időkésések hatását, amelyeket a digitális szabályozók okoznak és a kommunikáció során fellépő esetleges adatcsomagvesztések növelnek. Két szabályozási stratégiát vezettem be, amelyek prediktorok segítségével képesek az időkésés destabilizáló hatását kiküszöbölni. Kiszámítottam a szabályozó paraméterek terében az ún. rendszer-stabilitás (plant stability) és az ún. járműcsoport-stabilitás (string stability) tartományait, valamint meghatároztam a legkisebb megengedhető (stabil) követési időt a járművek között. Ez alapján kimondható a következő tézis.

Járműcsoport vezeték nélküli kommunikáción alapuló szabályozásakor a digitális szabályozók időben periodikus időkésést okoznak a járművek szabályozási köreibben. Egy vezető-követő jármű páros esetén, véges spektrum hozzárendeléses prediktív szabályozót alkalmazva az időkésés destabilizáló hatása kiküszöbölhető a követő autó pozíciójának és sebességének egy mintavételezési időnyivel előre történő predikciójával. E predikció növeli

a rendszer-stabilitás (plant stability) és a járműsoport-stabilitás (string stability) tartományait a szabályozó paraméterek terében, illetve másfélszeresére növeli a kritikus mintavételezési időt (amely felett a járműsoport-stabilitás tartománya eltűnik). A járművek közötti kommunikáció során fellépő adatcsomag-vesztések növelik az időkésést, csökkentik a stabil paramétertartományt és a kritikus mintavételezési időt. A rendszer-stabilitás tartománya visszanyerhető a követési távolság predikciójával oly módon, hogy a vezető és a követő járművek által az adatcsomag-vesztések ideje alatt megtett utat becsüljük. A járműsoport-stabilitás tartománya pedig növelhető a vezető autó sebességének szűrésével véges impulzus válasz szűrőt alkalmazva.

Kapcsolódó publikációk: [3, 4].

3. Tézis

Megvizsgáltam a szerszámgéprezgések kialakulását és a bistabilitás jelenségét az ortogonális esztergálási folyamatok egy szabadsági fokú mechanikai modelljén. Elvégeztem az esztergálás folyamatát leíró nemlineáris, időkésés differenciálegyenlet Hopf- és dupla Hopf-bifurkációinak számítását. Ez alapján kimondható az alábbi tézis.

Tekintsük az ortogonális esztergálás egy szabadsági fokú mechanikai modelljét, ahol a forgácsolóerő koncentrált erő, amely a forgácsvastagság monoton növekvő függvénye, és ahol a forgácsolóerő jelenti az egyetlen nemlinearitást a megmunkáló rendszer dinamikájában. Ekkor létezik egy bistabil tartomány a technológiai paraméterek terében, ahol stabil megmunkálás és nagy amplitúdójú szerszámgéprezgések egyaránt előfordulhatnak, azaz forgácsolás közben szerszámgéprezgések alakulhatnak ki, ha a rendszert kellően nagy zavarások érik. A bistabil

technológiai paraméter tartomány a következő képlettel becsülhető a fordulatszámától függetlenül:

$$\begin{aligned} \frac{a_H - a_{BB}}{a_H} &= 1 - \left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{4^{k-1}} \binom{2k-1}{k} \eta_{2k-1} \right)^{-1} \\ &= 1 - \left(1 + \frac{3}{4}\eta_3 + \frac{10}{16}\eta_5 + \frac{35}{64}\eta_7 + \frac{126}{256}\eta_9 + \dots \right)^{-1}, \end{aligned}$$

ahol a_H jelöli az a forgácsszélesség legnagyobb értékét, amelynél a megmunkálás lineárisan stabil, míg a_{BB} jelöli a legkisebb forgácsszélességet, ahol a binstabilitás jelensége előfordulhat (azaz, a megmunkálás binstabil $a_{BB} < a < a_H$ esetén). Az η_m ($m \in \mathbb{Z}^+$) paraméterek dimenziótlán forgácsolóerő együtthatók, amelyek a h_0 fordulatonkénti előtolásból és a forgácsvastagságtól függő f_q fajlagos forgácsolóerő deriváltjaiból számíthatók:

$$\eta_m = (h_0^{m-1} f_q^{(m)}(h_0)) / (m! f_q'(h_0)).$$

Kapcsolódó publikációk: [5–9].

4. Tézis

Megvizsgáltam az esztergálási folyamatok egy szabadsági fokú mechanikai modelljét úgy, hogy a forgácsolóerőt egy szerszám homlokszélületén megoszló erőrendszer eredőjeként számítottam. Elvégeztem a megfelelő nemlineáris, konstans illetve állapotfüggő megoszló időkésést tartalmazó mozgásegyenletek vizsgálatát. Ez alapján kimondható az alábbi tézis.

Tekintsük az ortogonális esztergálás egy szabadsági fokú mechanikai modelljét, ahol a forgácsolóerő a forgácsvastagság monoton növekvő függvénye, és ahol a forgácsolóerő jelenti az egyetlen nemlinearitást a megmunkáló rendszer dinamikájában. Ekkor a forgácsolóerő szerszám homlokszélülete mentén történő megoszlása a következő hatással bír a szerszámgéprezgések kialakulására a koncentrált forgácsolóerő esetéhez képest.

Ha a szerszám és a forgács közötti érintkezési felület hossza (ahol a megoszló forgácsolóerő-rendszer működik) időben állandó, akkor a következő állítások teljesülnek. A lineárisan stabil technológiai paraméter tartomány határán szubkritikus Hopf-bifurkáció lép fel a fordulatszám-tól függetlenül. Ezért létezik egy bistabil technológiai paraméter tartomány, ahol stabil megmunkálás és nagy amplitúdójú szerszámgéprezgések egyaránt előfordulhatnak, azaz forgácsolás közben szerszámgéprezgézés alakulhat ki, ha a rendszert kellően nagy zavarások érik. A bistabil tartomány mérete független a forgácsolóerő megoszlását leíró függvény alakjától: a lineárisan stabil tartománynak közelítőleg ugyanakkora hányadát foglalja el, mint koncentrált forgácsolóerő esetén.

Ha a szerszám és a forgács közötti érintkezési felület hossza a nominális forgácsvastagsággal arányos, akkor a következő állítások teljesülnek. A leíró mozgásegyenlet állapotfüggő megoszló időkésést tartalmaz. A lineárisan stabil technológiai paraméter tartomány az időben állandó érintkezési felület esetén számítottal azonos. A lineáris stabilitási határon bekövetkező Hopf-bifurkáció szubkritikus és szuperkritikus is lehet a fordulatszám-tól függően. Így a bistabil technológiai paraméter tartomány eltűnik egyes fordulatszám tartományokban.

Kapcsolódó publikációk: [10–12].

5. Tézis

Megvizsgáltam egy sebességfüggő forgácsolóerő modellt marási folyamatok esetén, amely figyelembe veszi, hogy a szerszám és a munkadarab közötti rezgések során változik a vágási irány. Levezettem a szerszámgéprezgések leíró időben periodikus együtt-hatójú időkéséses mozgásegyenletet, és megvizsgáltam az állandósult megoldás stabilitását. Ez alapján kimondható a következő

tézis.

Marási folyamatok során, az egyes szerszáméleknél érvényes vágási irány függ a szerszám és a munkadarab között bekövetkező szerszámgéprezgésektől. Ennek figyelembevételével a forgácsvastagság kifejezése és a forgácsolóerő tangenciális és radiális komponensekre való felbontása függ a rezgési sebességtől. Ez a marás egy szabadsági fokú lineáris mechanikai modelljében egy időben periodikus, fordulatszámmal fordítottan arányos csillapítás megjelenéséhez vezet. Az időben periodikus csillapítás függ a radiális fogásmélységtől és befolyásolja a szerszámgéprezgések kialakulását. Nagy radiális fogásmélységű marás esetén a megjelenő csillapítás nem negatív, így a legnagyobb stabil (szerszámgéprezgések kialakulásától mentes) axiális fogásmélység érték növekszik a fordulatszám csökkentésével. Alacsony radiális fogásmélységű marás esetén a megjelenő csillapítás nem pozitív, így a legnagyobb stabil axiális fogásmélység érték csökken a fordulatszám csökkentésével.

Kapcsolódó publikáció: [13].

6. Tézis

Megvizsgáltam a marási folyamatok egy szabadsági fokú mechanikai modelljét az egyes homloklfelületeken működő forgácsolóerőt megoszló erőrendszer eredőjeként modellezve. Levezettem a szerszámgéprezgéseket leíró mozgásegyenletet, amely egy időben periodikus együtthatójú és időben periodikus megoszló időkésést tartalmazó differenciálegyenlet. Elvégeztem az állandósult megoldás stabilitásvizsgálatát. Ez alapján kimondható az alábbi tézis.

Marási folyamatok esetén a forgácsolóerő szerszám homloklfelületei mentén történő megoszlása a következő kvalitatív hatással bír a lineáris szerszámgéprezgé-

sek megjelenésére a koncentrált forgácsolóerő esetéhez képest. A forgácsolóerő megoszlása miatt a legnagyobb stabil (szerszámgéprezgések kialakulásától mentes) axiális fogásmélység érték növekszik a fordulatszám csökkentésével. Ez a jelenség ellenirányú és egyenirányú marás esetén egyaránt fellép a radiális fogásmélységtől függetlenül. A hatás hangsúlyosabb egyenirányú marás esetén, mint ellenirányú marás esetén.

Kapcsolódó publikációk: [14, 15].

Irodalomjegyzék

- [1] T. G. Molnár and T. Insperger. On the stabilizability of the delayed inverted pendulum controlled by finite spectrum assignment in case of parameter uncertainties. In *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences*, number DETC2013–12316, Portland, OR, USA, 2013.
- [2] T. G. Molnár and T. Insperger. On the robust stabilizability of unstable systems with feedback delay by finite spectrum assignment. *Journal of Vibration and Control*, 22(3):649–661, 2016.
- [3] T. G. Molnár, W. B. Qin, T. Insperger, and G. Orosz. Predictor design for connected cruise control subject to packet loss. In *Proceedings of the 12th IFAC Workshop on Time Delay Systems*, volume 48, pages 428–433, Ann Arbor, MI, USA, 2015.
- [4] T. G. Molnár, W. B. Qin, T. Insperger, and G. Orosz. Application of predictor feedback to compensate time delays in connected cruise control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, accepted, 2017.
- [5] T. G. Molnár, T. Insperger, and G. Stépán. Analytical estimations of limit cycle amplitude for delay-differential equations. *Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations*, 2016(77):1–10, 2016.
- [6] T. G. Molnár, T. Insperger, and G. Stépán. Estimation of safe chatter-free technological parameter regions for machining operations. In *Proceedings of the 7th CIRP Conference on High Performance Cutting*, volume 46, pages 464–467, Chemnitz, Germany, 2016.
- [7] T. G. Molnár, Z. Dombóvári, T. Insperger, and G. Stépán. Dynamics of cutting near double Hopf bifurcation. In *Proceedings of the IUTAM Symposium on Nonlinear and Delayed Dynamics of Mechatronic Systems*, volume 22, pages 123–130, Nanjing, China, 2017.
- [8] T. G. Molnar, Z. Dombovari, T. Insperger, and G. Stepan. On the analysis of the double Hopf bifurcation in machining processes via center manifold reduction. *Proceedings of the Royal Society A - Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, accepted, 2017.
- [9] T. G. Molnar, T. Insperger, and G. Stepan. Closed-form estima-

tions of the bistable region in metal cutting via the method of averaging. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, submitted, 2017.

- [10] T. G. Molnár, T. Insperger, S. J. Hogan, and G. Stépán. Investigating multiscale phenomena in machining: the effect of cutting-force distribution along the tool's rake face on process stability. In *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences*, number DETC2015-47165, Boston, MA, USA, 2015.
- [11] T. G. Molnár, T. Insperger, S. J. Hogan, and G. Stépán. Estimation of the bistable zone for machining operations for the case of a distributed cutting-force model. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 11(5):051008 (10 pages), 2016.
- [12] T. G. Molnár, T. Insperger, and G. Stépán. State-dependent distributed-delay model of orthogonal cutting. *Nonlinear Dynamics*, 84(3):1147–1156, 2016.
- [13] T. G. Molnár, T. Insperger, D. Bachrathy, and G. Stépán. Extension of process damping to milling with low radial immersion. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(9):2545–2556, 2017.
- [14] T. G. Molnár and T. Insperger. On the effect of distributed regenerative delay on the stability lobe diagrams of milling processes. *Periodica Polytechnica - Mechanical Engineering*, 59(3):126–136, 2015.
- [15] T. G. Molnár and T. Insperger. Marási folyamat stabilitása a szerszámélen megoszló állandó intenzitású forgácsoló erőrendszer esetén (in Hungarian). In *XII. Magyar Mechanikai Konferencia*, number 231, Miskolc, Hungary, 2015.