

Opponensi vélemény  
**Insperger Tamás**  
“Stability of Mechanical Systems with Varying Time  
Delays”  
 (“Változó időkéésést tartalmazó gépészeti rendszerek  
stabilitása”)  
című MTA doktori értekezéséről

## **Témaválasztás, motiváció, általános megjegyzések**

Időben és/vagy térben változó (fizikai) mennyiségek leírásához és az ezeket generáló természetes vagy technológiai folyamatok működésének mélyebb megértéséhez és szabályozásához megfelelő dinamikai modellekre van szükség. Ezen modellek részletességét és leíróképességét alapvetően befolyásolja a modellezési cél. A mérnöki gyakorlatban szabályozótervezési célra leggyakrabban lineáris (idő-invariáns vagy változó paraméterű), esetleg viszonylag alacsony dimenziós nemlineáris (lehetőleg input-affin) modelleket alkalmaznak. Köztudott azonban, hogy számos kulcsfontosságú dinamikai jelenség nem magyarázható és nem is befolyásolható kellőképpen a rendszerben jelenlévő időkéésések figyelembevétele nélkül. Ilyen jelenségeket produkálhatnak pl. a szállítási késleltetéseket tartalmazó folyamatmodellek, bizonyos közlekedési modellek és a disszertációban vizsgált mechanikai modellek is. Fontos külön megjegyezni, hogy a hálózati kommunikációs környezetben működő szabályozórendszerek (kiber-fizikai rendszerek) széles körű elterjedésével a konstans és változó időkéésleltetések modellezése és hatásuk analízise egyre fontosabb és általánosabb problémává válik, hiszen a hálózati késleltetések és az esetleges csomagkiesések miatt az egyenletes mintavételezés és/vagy az azonnali beavatkozás sok esetben reálisan már nem feltételezhető. Egyértelműen elmondható tehát, hogy a disszertáció a nemzetközi kutatások fókuszában álló területet dolgoz fel, amely komoly elméleti és gyakorlati továbblépési lehetőségeket nyújt. A szerző által választott gépi számításokkal támogatott matematikailag igényes megközelítés szintén megfelel a legmagasabb színvonalú nemzetközi trendeknek.

## **Formai észrevételek**

A tetszetős kivitelű angol nyelvű dolgozat 102 számozott oldal terjedelmű, beleértve ebbe az irodalomjegyzéket és a két függeléket is. A bevezetést egy tömör matematikai összefoglaló,

majd öt érdemi fejezet követi, amelyekhez az egyes tézispontok kapcsolódnak. Ezután következik egy rövid összefoglalás és végül egy két részből álló függelék. A választott szerkesztési megoldás lehetővé teszi a szerző saját tudományos eredményeinek elkülönítését a szakirodalom többi részétől. A 249 elemből álló irodalomjegyzék a disszertációban külön megjelölés nélkül tartalmazza a tézisekhez kapcsolódó publikációkat is, de a téziszüzetben ez utóbbiak már külön listában szerepelnek. A dolgozat angolsága és a szakkifejezések használata megítélesem szerint jó színvonalú, a fogalmak és módszerek leírása a terjedelmi korlátból is adódó tömörség ellenére megfelelően követhető. A leírást a szerző szinte könyvszerűen egységes keretbe foglalta. Az ábrák igényesen szerkesztettek, és hatékonyan támogatják a választott megoldások megértését és a közölt eredmények értelmezését. Megállapítható tehát, hogy az értekezés kifogástalanul teljesíti az MTA doktora értekezésekkel szemben támasztott formai követelményeket.

## Az egyes fejezetekhez tartozó tartalmi megjegyzések és kérdések

### 1. fejezet (Bevezetés)

A meglehetősen tömör (3 oldalas) bevezetés a vizsgált témakörhöz tartozó legalapvetőbb irodalmi hivatkozásokat tartalmazza, és egy-egy bekezdésben összefoglalja a 3-7. fejezetekben és az ezekhez kapcsolódó tézispontokban található új eredményeket. A témaspecifikus rövid irodalmi összefoglalásokat az egyes érdemi fejezetek bevezetői tartalmazzák.

### 2. fejezet (Matematikai összefoglaló)

Ebben a lényegretörően és gondosan szerkesztett áttekintő fejezetben található a később alkalmazott közönséges differenciálegyenletekre vonatkozó jelölések és a megoldásokra vonatkozó alapvető ismeretek a lineáris-időinvariáns esettől kezdve egészen a legnehezebben kezelhető, állapotfüggő késleltetéseket tartalmazó rendszermodellig. Tartalmilag ide kapcsolódik az A függelék, ahol a bemenettel ellátott (inhomogén) lineáris-időinvariáns eset megoldása található. Itt a különböző reprezentációk összekapcsolása miatt esetleg érdemes lett volna megemlíteni, hogy az exponenciális mátrixfüggvény a rezolvens  $((sI - A)^{-1})$  inverz Laplace-transzformáltjaként is megkapható, és ennek megfelelően az (A.15) megoldás Laplace-transzformációval is könnyen kiszámítható.

### 3. fejezet

A fejezetben ismertetett magasabbrendű szemi-diszkretizációs módszer lineáris, periodikus, késleltetett differenciálegyenletek közelítő megoldására és numerikus stabilitásvizsgálatára alkalmas. A kiindulópont egy teljes állapotvisszacsatolással ellátott periodikus állapot- és bemeneti mátrixszal rendelkező lineáris rendszermodell, ahol a bemenet időben periodikusan változó késleltetéseket tartalmaz. A javasolt diszkretizációs módszernél a periodikusan változó együtthatómátrixokat és késleltetéseket két mintavételi időpont között konstans (átlagos) értékekkel, a késleltetett bemenetet pedig egy  $q$ -adrendű Lagrange interpolációs polinommal

közelíti a szerző. Így két mintavételi időpont között a kezdeti értékek ismeretében analitikusan is megoldható a kapott lineáris-időinvariáns közelítő rendszermodell, a folytonos megoldás pedig már egzakt módon diszkrétizálható időben. A közelítési hibára  $q = 0$  és  $q = 1$  esetén a szerző jól használható felső becsléseket ad a diszkrétizációs időintervallum függvényében.

#### **Kérdések, megjegyzések**

1. Pontosan milyen kapcsolat áll fenn a (3.1) és a (3.4) egyenletekben szereplő rendszerek aszimptotikus stabilitása között?
2. A (3.1) egyenletben szereplő modell megengedi több különböző késleltetés leírását is. Kérem a szerzőt, mutasson egy példát ilyen modell stabilitási analízisére, ha korábban vizsgáltak ilyet.

### **4. fejezet**

A 4. fejezetben a szerző ortogonális esztergálási folyamatok dinamikáját vizsgálja. Megmutatja, hogy a szerszám és a munkadarab közötti relatív rezgések figyelembevételére esetén a folyamatot állapotfüggő időkésést tartalmazó nemlineáris késleltetett differenciálegyenlet-rendszer írja le. Ezt követi a konstans megoldás körül linearizált rendszermodell felírása és stabilitásvizsgálata az állandó késleltetést ill. az állapotfüggő késleltetést tartalmazó esetekben. A szerző megmutatja, hogy állapotfüggő késleltetés esetén a stabilitási tartomány a fordulatszám és a fogásmélység függvényében kissé bővebb, mint az állandó késleltetésű esetben.

#### **Kérdések, megjegyzések**

3. Hogyan teljesülnek a stabilitás igazolására felhasznált [84]-es hivatkozásban szereplő feltételek a vizsgált esztergálási folyamat modelljére?
4. Véleményem szerint a fejezethez kapcsolódó 2. Tézis értékét mérnöki szempontból tovább növelné annak explicit szerepeltetése, hogy matematikai formulával megadható és fizikailag is interpretálható kapcsolat van az állandó késleltetést és az állapotfüggő késleltetést tartalmazó modell stabilitási tartománya között.

### **5. fejezet**

A fejezet periodikusan változó fordulatszámú marási folyamatok modellezésével és stabilitásvizsgálatával foglalkozik. Linearizálás után a modell a 3. fejezetben vizsgált rendszerosztályba tartozik, így stabilitása hatékonyan analizálható az ott ismertetett szemi-diszkrétizációs technika felhasználásával. A szerző itt is összehasonlítja az állandó és az állapotfüggő késleltetés eseteit. A pályázó társszerzőivel kísérletileg is kimutatta, hogy a fordulatszám megfelelő változtatása bizonyos fordulatszám-tartományokban lényegesen javíthatja a szabályozás pontosságát.

#### **Kérdés**

5. A periódus felbontását jellemző, 57. oldalon szereplő  $p$  értékek a számítási igény szempontjából meglehetősen nagyoknak tűnnek (800-8000 között). A 3. fejezetből korábban

kiderült, hogy a periódus egyre finomabb felbontásával nő a (3.18) egyenletben szereplő  $\Phi$  monodrómia mátrix mérete és a kiszámításához szükséges mátrixszorzások száma is. Történetek-e arra vonatkozó vizsgálatok, hogy hogyan lehet a  $\Phi$  mátrixot a gyakorlatban hatékonyan kiszámolni? (Ha igen, milyen eredménnyel?)

## 6. fejezet

A 6. fejezet ismerteti az ún. ‘beavatkozom-és-várok’ módszert, amely ismert konstans bemeneti késleltetést tartalmazó lineáris rendszerek stabilizáló szabályozására alkalmas. A módszer lényege, hogy egy periodikus  $\mathbf{G}$  időfüggvényt tartalmazó visszacsatolással az eredeti rendszert olyanná lehet alakítani, amelynek stabilitása a  $\mathbf{G}$  függvénnyel megadott megfelelő kapcsolási stratégia esetén egy véges dimenziós monodrómia mátrix sajátértékeinek meghatározásával vizsgálható. A visszacsatolás a késleltetésnél hosszabb várakozási idő alatt ki van kapcsolva, ami lehetővé teszi, hogy a rendszer ezen intervallum alatti autonóm fejlődését kihasználva a monodrómia mátrix viszonylag könnyen kiszámítható legyen. Az eredmények rendszerelméleti szempontból is rendkívül tanulságosak, hiszen a beavatkozás megfelelő ütemű kikapcsolása még akkor is biztosíthatja a zárt rendszer stabilitását, ha ez a cél a késleltetés miatt bizonyíthatóan nem érhető el konstans erősítésű állapotvisszacsatolással. A kidolgozott módszert a szerző a beavatkozási késleltetéssel ellátott inverz inga modelljén illusztrálja.

### Kérdések, megjegyzések

6. Létezik-e (pl. a lineáris időinvariáns rendszereknél rendelkezésre álló pólusáthelyezés, lineáris kvadratikus szabályozótervezés stb. eszközökhöz hasonló) tervezési módszer stabilizáló  $\Gamma$  meghatározására adott visszacsatolási struktúra esetén?
7. A rendszermodell ismeretében hogyan érdemes  $t_a$ -t és  $t_w$ -t megválasztani azon kívül, hogy a  $t_w \geq \tau$  feltétel teljesüljön?
8. Végeztek-e arra vonatkozó elméleti vagy szimulációs vizsgálatot, hogy hogyan működik a módszer változó időkézés esetén?

## 7. fejezet

A fejezet témája a beavatkozom-és-várok módszer alkalmazásának bemutatása visszacsatolási késleltetéssel rendelkező erőszabályozási feladatok megoldására. Kísérleti eredmények is mutatják, hogy a késleltetés a zárt rendszer stabilitásvizsgálatánál nem hanyagolható el. A szabályozott rendszer modell alapján számolt ill. kísérleti eredményekből meghatározott stabilitási tartományai jó egyezést mutatnak. Megállapítható, hogy a beavatkozom-és-várok módszer minden vizsgált késleltetési értéknél nagyobb visszacsatolási erősítéseket enged meg, mint a konstans erősítésű lineáris visszacsatolás, és ez lényegesen csökkenti a maximális szabályozási hibát.

### Kérdés

9. A kísérletileg tapasztalt maximális szabályozási hiba nagyobb késleltetések esetén a 7.5. ábrán észrevehetően nagyobb, a 7.6. ábrán pedig kisebb, mint a modell alapján elméletileg meghatározott határ. Mi lehet ennek az oka?

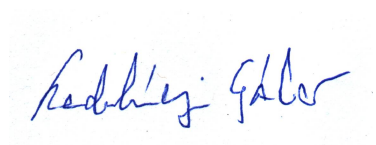
## A tudományos munkához kapcsolódó publikációk értékelése

A szerző egy Springer kiadónál megjelent könyvet, egy könyvfejezetet, 14 magas színvonalú, műszaki szakterülethez kapcsolódó tudományos folyóiratban megjelent impakt faktoros folyóiratcikket és 6 referált nemzetközi konferenciaticket sorol fel a disszertációhoz szorosán kapcsolódva. A publikációk döntő többsége első szerzős, és egy 2014-es folyóiratcikk kivételével 2005 és 2011 között jelentek meg, így van lehetőség a nemzetközi tudományos közösségekben kifejtett hatásuk vizsgálatára is. Csak a tézisfüzetben felsorolt 22 publikációra a szerző az MTMT-ben szereplő ellenőrzött adatok alapján eddig több mint 470 független hivatkozást kapott. Különösen magasan idézett a szemi-diszkretizációs megközelítés és a beavatkozom-és-várok elv elméleti és alkalmazott eredményeket bemutató publikációkban egyaránt. Érdekes itt megjegyezni, hogy a szerző összesen több mint 2100 független hivatkozással rendelkezik, és a PhD fokozat megszerzése óta több mint 40 színvonalas folyóiratcikket publikált. Egyértelműen megállapítható tehát, hogy a pályázó publikációs teljesítménye kimagasló, tudományos munkájának nemzetközi hatása jelentős, eredményeit független kutatók alkalmazzák és továbbfejlesztik.

## Összefoglaló vélemény

Összefoglalásként megállapítható, hogy a pályázó az időkést tartalmazó dinamikus rendszerek stabilitási analízise és szabályozása területén jelentős önálló eredményeket ért el a PhD fokozat megszerzése óta. Az értekezés témájához kiemelkedően színvonalas és magas idézettségű publikációs lista kapcsolódik. A közölt kísérleti eredmények is alátámasztják a problémafelvetések gyakorlati jelentőségét és a megoldások alkalmazhatóságát. A téziseket a pályázó önálló, új tudományos eredményeiként elfogadom. A disszertációban szereplő eredmények megítélésem szerint értékes hozzájárulást jelentenek a komplex dinamikai jelenségeket fizikai alapon leíró nagy megbízhatóságú dinamikus modellek kifejlesztéséhez, analíziséhez és szabályozásához. A fentiek alapján javaslom a nyilvános vita kitűzését és Insperger Tamás részére az MTA doktora cím odaítélését.

Budapest, 2015. április 14.



Szederkényi Gábor  
az MTA doktora