Bírálói vélemény

Insperger Tamás: "Stability of Mechanical Systems with Varying Time Delays"
(Változó időkésést tartalmazó gépészeti rendszerek stabilitása)
c. MTA doktori (DSc) értekezésről

Az értekezés a változó időkésést tartalmazó és a paraméterekben periodikus

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + \sum_{j=1}^{g} B_j(t)Dx(t-\tau_j(t))$$

dinamikus rendszerek stabilitási kérdéseivel foglalkozik konstans D-mátrixú késleltetett állapot-visszacsatolás esetén. A stabilitásvizsgálat alapja a bázis Floquet-elmélet, amely alapján viszonylag egyszerűen következtetni lehet a stabilitás határára a paraméterek különféle tartományaiban periodikus LTV rendszerek esetén. Foglalkozik még a kiterjesztés lehetőségével állapotfüggő $\tau_j(t, x(t))$ időkésés esetére is, amikor módszert kell találni a feladathoz tatozó infinitezimális operátor meghatározására, és az operátor spektruma nemnulla elemeinek, az ú.n. karakterisztikus multiplikátoroknak meghatározására.

A stabilitási kérdéseken kívül fontos kérdés még a kielégítően pontos numerikus módszer kifejlesztése ilyen rendszerek szimulációjához, a módszerek alkalmazása reális gépészeti problémák megoldására, és egyszerű elvű irányítási módszerek keresése speciális esetekre.

A jelen DSc disszertációban vizsgált problémák előzményei a jelölt 2002-ben készült PhD értekezésére vezethetők vissza, és annak egyenes továbbfejlesztései, melyet részben két Bolyai-ösztöndíj keretében végzett kutatás is megalapozott.

Az értekezés 8 fejezetből és 2 függelékből áll. A tézisek a 3-7. fejezetek végén kerülnek megfogalmazásra.

Az <u>1. fejezet</u> bevezetés, amely a dolgozat struktúráját mutatja be.

A <u>2. fejezet</u> a matematikai alapokkal foglalkozik. Röviden bemutatja az LTI és LTV rendszerek tranziens számításának eszközeit (exponenciális mátrix, alapmátrix), az alapmátrix speciális $\Phi(t) = P(t)e^{Bt}$ alakját T-periódusú LTV rendszerek esetén, és a $\Phi(T) = e^{BT}$ monodrómia mátrix központi szerepét a stabilitásvizsgálatban a Floquet-elmélet szerint, továbbá a zárt alakban nem meghatározható $\Phi(T)$ szakaszonként konstans approximáción alapuló numerikus közelítésének elvét. Vázolja a módszer kiterjesztésének lehetőségét általános lineáris időkésleltetett differenciálegyenlettel (L-DDE) leírható $\dot{x}(t) = L(t, x_t)$ rendszerek esetére, ahol $x_t(\vartheta) = x(t+\vartheta)$, $\vartheta \in [-\sigma, 0]$ folytonos függvény és L korlátos lineáris operátor a folytonos függvények Banach-tere felett. A vizsgálatokhoz az $x_t = \mathcal{U}(t)x_0$ megoldás infinitezimális generátorát kellene meghatározni, amelynek ismeretében a karakterisztikus (Floquet) multiplikátorok a $Ker(\mu I - \mathcal{U}(T)) \neq \{0\}$, $\mu \neq 0$ feltételt elégítik ki.

A <u>3. fejezet</u> (kiegészítve az A-B. függelékekkel) numerikus módszert ad az $x(t)$ megoldás magasabb rendű approximációjára az $\dot{x}(t) = A(t)x(t) + \sum_{j=1}^{g} B_j(t)Dx(t-\tau_j(t))$ rendszer esetén. A szemi-diszkretizációs módszer lényege, hogy a periodikus paramétereket és az időkésést szakaszonként lineárisan, az $x(t-\tau_j(t))$ késleltetett tagot pedig az állapot néhány (q-darab) késleltetett értékének lineáris kombinációjával approximálja. A diszkrét időskála $t_i = ih$, a lépésköz $h = T/p$, az osztópontok (grid) száma p, és a közelítő $\Phi(T)$ számítása elsősorban p-darab exponenciális mátrix meghatározását igényli. A p grid-szám nagyra választandó a szükséges pontosság biztosításához.

A jelölt módszert ad az approximációs hiba meghatározására a h lépésköz függvényében. Öt plusz egy tagra bontja az approximációs hibát, és vizsgálja a teljes hiba felső becslését az öt tag (integrálok) becslésének függvényében. Ehhez meghatározza a legkisebb h-fokszámokat, amelyek az öt tag felső becslésében rendre megjelennek. Ha $h<1$ és a fokszám i, akkor ez a megfelelő hibatag $O(h^{i+1})$ felső becslésének tekinthető. A teljes approximációs hiba $h<1$ esetén az öt tag felső becslésének ismeretében:

$$\|x(t)-y(t)\| \le \left\| J_0(t) + \sum_{j=1}^{g} \sum_{k=1}^{4} J_{j,k}(t) \right\| e^{\|A_0\| t}$$

A módszer alkalmazását a stabilitási térkép meghatározására a késleltetett Mathieu-egyenlettel leírható (másodrendű holtidős) periodikus rendszer esetén mutatja be $D=[1\ \ 0]$ és nulladrendű és elsőrendű szemi-diszkretizáció esetén. Megjegyzendő, hogy az induló $p=5$ grid esetén $h=2\pi/5>1$ volt.

A bizonyítás részleteit a B. Függelékben tárgyalja, azonban ott a kézi számítás egyetlen tagra sem szerepel, például „Substitution of the Taylor expansions (B.5) and (B.7) with (B.10) into (B.1) gives $J_0(h)=(1/12)\tilde{A}_1\tilde{x}_1 h^3 + O(h^4)$”. Nos, ezek a számítások (a dolgozatban „substitution”), és hasonlóan a többi tagé is, alapos kiértékeléseket igényelnek az egyes integrálok esetében, tehát nem egyszerű behelyettesítésről van szó. A tézisfüzetből látszik, hogy a jelölt ehhez szimbolikus számítási eszközöket (Maple) is alkalmazott. Az eredmények 2002-ben kerültek először publikálásra.

A 4. fejezet az esztergálási folyamat állapotfüggő késleltetést tartalmazó kétváltozós nemlineáris periodikus modelljét mutatja be, ahol a nemlinearitás az erőkben (beavatkozó jel) jelenik meg. Először kidolgozásra került a linearizált model Hartung és Turi (2000) eredményeire hivatkozva, miszerint (bizonyos feltételek esetén) a linearizált modell triviális megoldásának aszimptotikus stabilitásából következik az eredeti modell konstans (kvázi-stacionér) állandósult megoldásának aszimptotikus stabilitása. A jelölt részletesen kidolgozta a linearizált modellt a konstans megoldás környezetében, amelynek SD-DDE állapotegyenletes alakja (4.24) és differenciálegyenletes ODE alakja (4.27)-(4.28). Konstans regeneratív késleltetés $(\tau=\bar{\tau})$ esetén a stabilitás csak (4.28)-tól függ, tehát egyváltozós probléma.

Konstans késleltetés esetén elvégezte a stabilitás vizsgálatot, és meghatározta a stabilitás térképet a két normalizált paraméter (fogásmélység és átlagos fordulatszám) függvényében. Ez a probléma a szabályozástechnika klasszikus módszereivel is elvégezhető volt.

Megjegyzem, hogy a stabilitási határon érvényes (4.31)-(4.32) egyenletek megoldására adott (4.33)-(4.34) összefüggések levezetésének részletei nem szerepelnek a dolgozatban („Solving this system of equations for H and Ω gives the D-curves), feltehetőleg azt kellett felhasználni, hogy

$$\frac{\sin(\alpha)}{1-\cos(\alpha)} = \frac{2\sin(\alpha/2)\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)+\cos^2(\alpha/2)-(\cos^2(\alpha/2)-\sin^2(\alpha/2))} = \frac{2}{\tan(\alpha/2)} \Rightarrow$$

$$\frac{\tan(\omega\bar{\tau}/2)}{2} = -\frac{\omega^2-\omega_n^2}{2\xi\omega_n\omega}$$

A stabilitási határok Hopf-bifurkációt reprezentálnak. A frekvencia arány diagramból megállapíthatók az öngerjesztő vibrációs frekvenciák.

Kidolgozta az esztergálási folyamat állapotfüggő késleltetést is megengedő modelljét szimmetrikus szerszámparaméterek esetén, melyek a (4.37)-(4.38) SD-DDE által írhatók le. A stabilitás analízist Stépán (1989) eredményeit követve végezte, amely a (4.42) karakterisztikus egyenletet eredményezte, amely két részre volt bontható. A transzcendens rész normalizálható volt az $1-(\rho / r_c)$ tényező bevezetésével, amely lehetőséget adott a konstans holtidő (H^*_{CD}) és az állapotfüggő holtidő (H^*_{SDD}) estére kapott eredmények összehasonlítására. Itt ρ a dimenziónélküli előtolás per fordulatszám és r_c a forgácsolóerő arány. Megmutatta, hogy az eltérés akkor jelentős, ha ρ (előtolás per fordulatszám) viszonylag nagy ($\rho \approx 0.1$), itt $H^*_{SDD} / H^*_{CD} \approx 1.0345$, ahol H^* a dimenziónélküli fogásmélység (vagy forgács szélesség). Ez az eset nagy előtolás és kis munkadarab átmérő esetén áll elő.

Az <u>5. fejezet</u> az egyváltozós marási folyamat modellezésével és stabilitási problémájával foglalkozik. Felteszi, hogy a fordulatszám periodikusan modulált: $\Omega(t) = \Omega_0 + \Omega_1 S(t),\ \Omega(t+T) = \Omega(t),\ S(t+T) = S(t)$, a szerszám fog $h_j(t)$ pályája cirkulárisan approximálható, a fogra ható eredő vágóerő *x* komponensének alakja:

$$F_x(t) = Q(t)(v_f \tau(t) - x(t) - x(t-\tau(t)))^q$$

$$Q(t) = \sum_{j=1}^{N} a_p g_j(t) \sin^q(\varphi_j(t))(K_t \cos(\varphi_j(t)) + K_r \sin(\varphi_j(t)))$$

ahol *N* a fogszám, *q* a vágóerő fokszám, v_f a konstans előtolás sebesség, *t,r* a tangenciális és radiális komponensre utal a vágóerőben, és az eredő nemlineáris DDE modell (5.16) szerint:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -Q(t)(v_f \tau(t) + x(t) - x(t-\tau(t)))^q$$

Ha a *T* modulációs periódus és a $\tau_0 = 60/(N\Omega_0)$ átlagos időkésés aránya racionális szám, azaz $i_1 T = i_2 \tau_0$, ahol i_1, i_2 relatív prím, akkor a nemlineáris DDE periodikus. Ha $x_p(t) = x_p(t + i_1 T)$ egy periodikus megoldás és $\xi(t)$ az additív perturbáció, akkor elsőfokú Taylor-közelítést alkalmazva és elhanyagolható $x_p(t)$ tagot (kis erő oszcillációt) feltételezve a marási folyamat modellje az (5.21) alakra hozható, amely:

$$\ddot{\xi}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{\xi}(t) + \omega_n^2 \xi(t) = -\tilde{G}(t)(\xi(t) - \xi(t-\tau(t))),$$

ahol a speciális direkcionális tényező $\tilde{G}(t) = \tilde{G}(t + i_1 T)$ szintén periodikus. A jelölt $D = [1\ 0]$ választás mellett átírta a linearizált modellt az (5.23)-(5.26) alakra, amely egy lineáris DDE időben változó időkésés (holtidő) mellett.

Először meghatározta a keletkező modellhez a stabilitási térképet átlagos fordulatszám esetén a fogásmélység függvényében. Ehhez elsőrendű szemi-diszkretizálást alkalmazott *p*=50 grid (periódus felosztás) mellett. Ekkor $\Omega_1 = 0$, $\Omega(t) = \Omega_0$ és az időkésés konstans $\tau_0 = 60/(N\Omega_0)$. Vizsgálta még a $G(t)$ direkcionális tényező alakjától való függést is. A karakterisztikus multiplikátorok három típusa fordult elő (másodlagos Hopf, ciklikusan behajló és periódus-kettőző bifurkációk). Többszörös vibrációs frekvenciák is lehetségesek, de ezek közül csak egy-kettő domináns.

A jelölt megvizsgálta a változó fordulatszám esetét is, ha $i_1 T = i_2 \tau_0$ teljesül. Nagy fordulatszámok esetén a fordulatszám változás nem eredményez jelentős javulást a stabilitási határban, csak az első periódus-kettőző görbe határán van enyhe javulás. Kisebb fordulatszámok esetén a stabilitás határok magasabb fogásmélység értéknél helyezkednek el.

Francia együttműködés keretében a francia partner marási folyamat esetén kísérletileg is verifikálta a stabiltási térkép helyességét és a változó fordulatszámmal való stabilizálás (vibrálás elnyomás) hatékonyságát.

A 6. fejezet a „várás és beavatkozás" elvet javasolja LTI rendszerek szabályozására, ha a beavatkozás csak τ időkéséssel (holtidővel) juthat érvényre, tehát az időkésést a szabályozó viszi be a rendszerbe. A szabályozó ciklikusan működik, periódus ideje $T = t_w + t_a$, ahol a várakozási idő $t_w \geq \tau$, az aktív szabályozási idő t_a, az irányítási törvény pedig

$$u(t) = G(t)Dx(t-\tau)$$

$$G(t) = \begin{cases} 0, & ha \quad 0 \leq (t \bmod T) < t_w \\ \Gamma(t \bmod T), & ha \quad t_w \leq (t \bmod T) < t_w + t_a =: T \end{cases}$$

Mivel az állapotegyenletben az LTI rendszer *A, B* mátrixai konstansak és a szabályozó ciklikus működésű (periodikus), ezért az egész rendszer periodikus, és alkalmazhatók a Floquet-elmélet eredményei. Mivel $x(T) = x^{(k+1)}(T) = \Phi^{(k+1)}(T)x(0)$, ha teljesül $t_w \geq \tau$, akkor $\Phi^{(k+1)}(T)$ véges sok lépésben integrálással meghatározható, ezért $\Phi^{(k+1)}(T)$ sajátértékeiből a stabilitás határai könnyen meghatározhatók. A vizsgálatoknál a holtidő után indult az első várakozási idő.

A módszert a szerző egy rúd-egyensúlyozási probléma keretében mutatja be, ahol a módszer alkalmazása előtt előbb linearizálni kellett a nemlineáris modellt.

A 7. fejezet a „várakozás és beavatkozás" módszert egy erő szabályozási feladatra alkalmazza, ahol a rendszer egyváltozós másodrendű lineáris rendszer, és az erő szabályozó egy holtidős P-szabályozó. A rendszer a „várakozás és beavatkozás" szabályozóval:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = -g(t)\omega_n^2 k_p x(t-\tau)$$

$$g(t) = \begin{cases} 0, & ha \quad 0 \leq (t \bmod T) < \tau \\ 1, & ha \quad t_w \leq (t \bmod T) < t_w + t_a = T \end{cases}$$

A szerző összehasonlítja a holtidős P-szabályozás klasszikus ($t_w = 0$) és a „várakozás és beavatkozás" ($t_w \neq 0$) elvű szabályozásának stabilitási és vibrációs frekvencia tulajdonságait. Egy mintarendszeren a „várakozás és beavatkozás" elvű szabályozás előnyös tulajdonságai kísérletileg is verifikálásra kerültek a BME-n a szerző vezetésével.

A 8. fejezet röviden áttekinti az értekezés eredményeit.

Az A. Függelék LTI rendszer tranziens számítását foglalja össze az exponenciális mátrix felhasználásával, melyet a gerjesztett oszcillátoron illusztrál a szerző. A B. Függelék a szemi-diszkretizációs módszer konvergencia kérdésinek részleteit vizsgálja periodikus LTV rendszer esetén, lásd még a korábbi megjegyzést erről.

Formai észrevételek:
Az értekezés terjedelme (102 oldal), az értekezés angol nyelvezete és stílusa jó. Gépelési hiba csak elvétve akad (például p.34, ahol index hiba van (4.24) utolsó sorában; vagy p.40 Fig. 4.5, ahol zárójelben precízebb lett volna $60 f_n$ a nevezőben a vízszintes tengely jelölésekor.). Az ábrák és kiértékelésük mintaszerű.

A tézisek értékelése:
A téziseket az alábbi formában és pontosításokkal tudom elfogadni.

1. tézis: Periodikus LTV alakú rendszer esetére, amelyben az állapot-visszacsatolás mátrixa konstans és a visszacsatolt állapot időben változó késleltetésű lehet, módszer került kidolgozásra a rendszer időben történő diszkretizálására. A lépésköz és a felbontás finomsága a periódusidő törtrésze. A módszer lehetővé teszi a stabilitáshatár számításához szükséges monodrómia mátrix approximációját. Megadja az approximációs hiba felső becslését és a benne szereplő öt főtag felső becslését, ha a lépésközre teljesül $h < 1$. A vizsgált gépészeti alkalmazásokban ez kezelhetően kis grid-szám mellett teljesül, mivel a T periódus idő viszonylag kicsi.

2. tézis: Kétváltozós nemlineáris periodikus modell kidolgozása az esztergálási folyamat vizsgálatához, amelyben a nemlineáris vágóerőkben állapotfüggő késleltetés is megengedett. Linearizálási módszertan kidolgozása és a különféle (közönséges és Frechet) deriváltak meghatározása. A linearizált alakra és a Floquet-elméletre épülő módszer kidolgozása a stabilitási tartomány meghatározására a rendszerparaméterek függvényében mind konstans, mind állapotfüggő késleltetések esetén. A finomabb modell stabilitási határai tágabbak, mint konstans időkésés esetén.

3. tézis: Egyváltozós nemlineáris periodikus modell kidolgozása marási folyamatok vizsgálatához, amelyben a nemlineáris vágóerők állapotfüggő részében időfüggő késleltetés is megengedett. Módszer kidolgozása a kvázi-stacionér megoldáshoz járuló additív perturbáció linearizált modelljének meghatározására. A periódusidő és a közepes időkésés aránya racionális szám kell, hogy legyen a stabilitásvizsgálat kezelhetőségéhez, a pillanatnyi forgácsszélesség cirkuláris összefüggéssel írható le. Meghatározásra került a stabilitási térkép a paramétertérben konstans és változó fordulatszám esetén. A nagysebességű tartományban a fordulatszám változtatás javító hatása kicsi, kisebb fordulatszámoknál a stabilitási határ növelhető a fogásmélység növelésével.

4-5. tézis: Egyszerű LTI rendszerek esetén a „várás és beavatkozás” elv javasolható a szabályozására, ha a beavatkozás csak időkéséssel (holtidővel) juthat érvényre. A szabályozó ciklikusan működik, periódus ideje a várakozási és az aktív beavatkozási idő összege, a várakozási idő célszerűen nagyobb a holtidőnél. A módszer alkalmazásra került a rúdegyensúlyozási probléma esetén a humán beavatkozás reflexkésésének figyelembevételére. A módszer sikeresen alkalmazható volt egyváltozós másodrendű lineáris rendszer holtidős P-szabályozására. Kisérletileg is igazolva lett, hogy a „várás és beavatkozás” kiegészítés csökkenteni képes az erőhibát.

Megjegyzés: Az utóbbi két tézist összevontan javaslom elfogadni, tekintettel azok kisebb súlyára a robusztus irányítások modern elméletének tükrében, és a két vizsgált probléma egyszerűségére és hasonlóságára. Nincsenek tapasztalatok a módszer alkalmazására instabil állapotmátrix esetén. Az 1. tézissel kapcsolatban megjegyzem, hogy az idő (és más változók) szerinti diszkretizálás elve jól ismert az optimális irányítások elméletében, lásd például az időoptimális irányítás tervezést jármű tesztpályák esetén.

A tézisek publikálása könyvekben, rangos nemzetközi folyóiratokban és nemzetközi konferenciák kiadványaiban megtörtént, a tézisek megfogalmazása a vonatkozó publikációkat is megjelöli. A publikációk impakt-faktor értéke rendkívül magas, és a publikációkra szintén nagyszámú hivatkozás történt külföldi szerzőktől.

Kérdések:

1. A periodikus nemlineáris rendszereket linearizálni kellett a stabilitási tartományok meghatározásához. Mi mondható a stabilitási határ paraméterfüggésének megbízhatóságáról a linearizálás következtében? Történtek-e (például az egyszerűbb, csak időfüggő késlelteté-

sek esetén) szimulációs kísérletek a lineáris határon lévő paraméterértékek közelében robusztus nemlineáris numerikus technikákkal?
2. A vizsgált példákban több esetben is szükség volt az állapotváltozó ismeretére. Történtek-e vizsgálatok az állapotbecslési pontosság és/vagy a modellparaméter bizonytalanság hatásának felmérésére a stabilitásvizsgálatoknál?
3. Léteznek fontos periodikus rendszerek, ahol nagy a periódusidő, és ezért a szimulációhoz szükséges lépésköz biztosításához extrém nagy grid-szám (felbontás-szám) lenne szükséges. Vannak-e javaslatai ennek áthidalására?

Összefoglalva megállapítom, hogy az értekezés fontos, a kutatások középpontjában álló modellezési, numerikus számítási és stabilitásvizsgálati kérdésekkel foglalkozott a gépészeti rendszerek területén, és a nemzetközi kutatások figyelembevételével is jelentős új saját eredményeket fogalmazott meg, melyeket egyedül és társszerzőkkel könyvekben, folyóiratokban és rangos konferenciákon publikált, és amelyekre nagyszámú rangos külföldi hivatkozás történt.

Az értekezés hiteles adatokat tartalmaz. A téziseket (korábbi észrevételeim fenntartása mellett) a fenti megfogalmazásban elfogadom. Az értekezés a korábbi gépészmérnöki PhD fokozat megszerzését követően jelentős eredeti tudományos eredménnyel gyarapította a gépipari rendszerek modellezését és stabilitásvizsgálatát, hozzájárult a tudományág fejlődéséhez, ezért az értekezés elfogadását és a nyilvános vita kitűzését javaslom a műszaki tudományok területén.

Budapest, 2015. március 19.

Lantos Béla
a műszaki tudomány (MTA) doktora