



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Műszaki Mechanikai Tanszék

PhD Tézisfüzet

**Forgácsolási folyamatok lokális és globális
dinamikai viselkedése**

DOMBÓVÁRI Zoltán

Témavezető:

Dr. STÉPÁN Gábor, egyetemi tanár

Budapest, 2012

Bevezetés

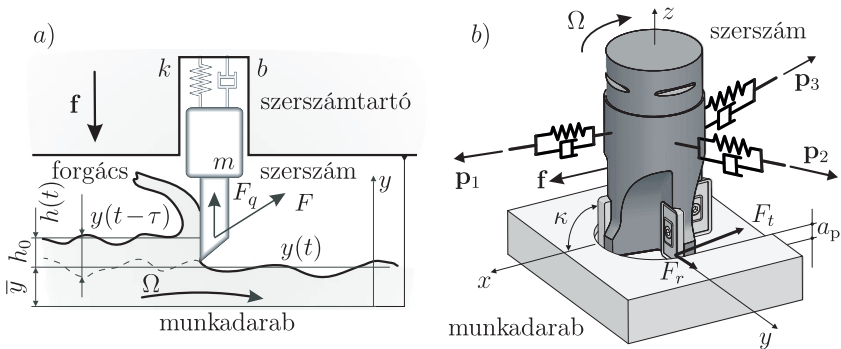
„... In addition, chatter is so inconsistent in character that the tendency of a machine to exhibit chatter effects is often not observed during the development stage.”
Tobias, S.A.¹

Különböző felépítésű szerszámgépek kaphatóak a kereskedelmi forgalomban, melyek kielégítik a gyártás során felmerülő technológiai elvárásokat. A szerszámépgyártó cégek manapság nem csak magát a szerszámgépet, hanem a munkadarabok gyártásához szükséges technológiai műveletsort is ajánlják. Ez arra ösztönzi a szerszámgép gyártó cégeket, hogy a szerszámgép tervezésén kívül a vele megbízhatóan elvégzendő technológiai folyamatot is megtervezzék, úgy, hogy az megfeleljen a megrendelő termelékenységi és minőségi követelményeinek. Versenyképességük megtartása miatt szimulációs és optimalizációs technikákat kezdtek alkalmazni, melyekkel a szerszámgépek viselkedése még megépítése előtt megjósolható. A technológiai folyamatok tervezése során a gyártósor optimalizálása, a szerszámgépek környezettől vagy a környezet szerszámgépektől való rezgésszigetelése, a szerszámgépek statikus merevsége, a felépítmény megfelelően hangolt dinamikai viselkedése és a szerszám-pálya tervezésénél alkalmazott stratégia különös fontossággal bír. Míg a gyártósor optimalizálása bonyolult szervezési feladat, a szerszám-pálya és a statikus merevség megtervezése geometriai feladat, addig a szerszámgépek dinamikai viselkedése külső gerjesztés vagy öngerjesztés hatására a newtoni mechanika módszereinek alkalmazását teszi szükségessé, felhasználva a mostanában kutatott nemlineáris és nem-sima rendszerek alkalmazott matematikai elméletét is. Az előírt pontosság elérése érdekében a szerszámgép belső szabályozó körének szabályoznia kell a felépítmény tehetetlenségéből adódó esetleges eltéréseket, továbbá, a szerszámgép felépítmény statikus merevségének egyensúlyt kell tartania a stabil stationárius megmunkálás közben – a forgácsleválasztás hatására – keletkező forgácsoló erővel, mely relatív pontatlanságot okozhat a szerszám és a munkadarab között. Marás esetén a szerszám időben periodikus vándorlása felület eltolódási hibát eredményez (surface location error, SLE), mely a forgácsoló erőből származó periodikus erőgerjesztés eredménye. Az eddig említett erőfeszítések, azonban mind hatástalanok, ha a marási folyamat során öngerjesztett rezgések keletkeznek. Az alkalmanként előforduló akadozó csúszással kapcsolatos stabilitásvesztés mellett a regeneratív hatás a legfőbb okozója szerszámgépek stabilitásvesztésének, kialakuló öngerjesztett rezgésének. Ez a rezgés rossz felületi minőséget eredményez és veszélyezteti a szerszámgép szerkezeti elemeit, továbbá károsíthatja a szerszám/szerszám-befogó/főorsó rendszerben. A regeneratív hatás a forgácsleválasztásból, a szerszám és munkadarab relatív dinamikai tulajdonságaiból és a munkadarab vagy a szerszám főmozgásból ered. Ennek során a szerszám egy élszegmense egy megfelelő másik él által már megmunkált felületet vág, ahol a felület a szerszám múltbeli rezgéséből származó mintázatot tartalmaz.

¹Tobias, S.A., 1965. Machine-tool Vibration, Blackie, London, Glasgow

Célkitűzések

A disszertáció célja az esztergálás és marás során felmerülő összetett dinamikai hatások elemzése, megfelelő alacsony dimenziós mechanikai modellek felépítése, melyek bár pontatlanabbak a végesselemes modelleknél, viszont dinamikai szempontból egyszerűbbek és a dinamikai jelenségek lényegét mérnöki szempontból kielégítően leírják. Az összetett és részletekbe menő modellezés helyett, úgynevezett empirikus forgácsoló erőkarakterisztikával veszem figyelembe a forgácsleválasztása során lokálisan jelentkező kapcsolt fizikai folyamatokat. A disszertáció egyes fejezeteiben, azonban foglalkozom a forgácsolás során keletkező időben változó forgácsoló erő pontosabb meghatározásával is. Az elméleti szempontból bonyolult nemlineáris és nem-sima, valamint rövid-regeneratív hatásokat az egy szabadsági fokú ortogonális forgácsolási modellen keresztül vizsgálom (1. ábra *a*). A marási eljárásokat több szabadsági fokú környezetben tanulmányozom (1. ábra *b*), hiszen ebben az esetben csak a stacionárius megoldás lineáris elméletét alkalmazom. A legtöbb esetben lehetőségem nyílt az elméleti eredmények kísérleti úton történő igazolására, melyeket a UBC, Manufacturing Automation Laboratory²-ban és az Ideko³-ban a DanobatGroup kutatási és fejlesztési központjában végeztem el. A dinamikus forgácsleválasztás tulajdonságait időben harmonikusan változtatott forgácsvastagság segítségével vizsgáltam. Az általános marási modellt speciális hullámos élű maró szerszám segítségével validáltam. Az elmélet alapján számítással meghatározott domináns rezgési frekvenciákat kísérletileg is megtaláltam. Végül, egy általam tervezett alkalmas mérési elrendezéssel a bi-stabil zóna jellegét minőségileg igazoltam.



1. ábra. *a*) az esztergálás egy szabadsági fokú ortogonális forgácsolás modellje, *b*) több szabadsági fokú marási eljárás mechanikai modellje.

²MAL: <http://www.mal.mech.ubc.ca/>

³Ideko: <http://www.ideko.es/>

Tézisek

1. Tézis

Az ortogonális forgácsolás egy szabadsági fokú modelljében a

$$F(h) = w(\rho_1 h + \rho_2 h^2 + \rho_3 h^3), \quad \rho_{1,3} > 0 \quad \text{and} \quad \rho_2 < 0, \quad (1)$$

alakú nemlineáris forgácsolási modellt feltételezve bebizonyítottam, hogy a lineáris stabilitási határ mentén keletkező Hopf-bifurkáció szubkritikus, ha a következő feltétel teljesül:

$$3\rho_1\rho_3 - \rho_2^2 > 0. \quad (2)$$

Megmutattam, hogy ez a feltétel akkor igaz, ha a forgácsoló erő karakterisztika érintője pozitív az inflexiós pontban, mely nagyteljesítményű forgácsolás esetén jelentkezhet és a gyakorlati esetekben mindig teljesül. Analitikus közelítést vezettem le a bi-stabil tartomány szélességére, mely a lineáris stabilitási határ alatt helyezkedik el. A közelítés azt a kritikus forgácsosszélesség értéket használja, amikor a instabil egyperiódusú határciklus éppen eléri a $h_0/\sqrt{2}$ értéket, azaz, a szerszám éppen elhagyja a munkadarab felületét. A stabilitási térképen a bi-stabil zóna alatt a megmunkálási folyamat biztonságosan rezgésmentes, globálisan stabilis. Megmutattam, hogy a bi-stabil zóna szélességének a forgácsvastagság függvényeként létezik maximuma. Ezt a kritikus értéket analitikusan közelítettem:

$$h_{\text{worst}} = -\frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (3)$$

Numerikus bifurkáció követő algoritmus segítségével (DDE-BIFTOOL) kiszámoltam a bistabil zóna pontos forgácsvastagság karakterisztikáját, mely mérnöki elfogadható pontossággal igazolta a maximumra adott analitikus közelítést.

A tézis eredményeit a disszertáció 2. Fejezete tárgyalja.

Kapcsolódó publikációk: [2, 3, 11, 20, 21, 22].

2. Tézis

Megalkottam azt a szakaszosan-sima nemlineáris modellt, melynek segítségével a szerszámcsúcs anyagból való ki- és belépése egyidejűleg leírható. A modell megfelelő paraméterek bevezetésével, és a szinguláris perturbáció segítségével simítható, mely alkalmassá teszi a modellt fél-analitikus vizsgálatát a DDE-BIFTOOL bifurkáció követő programcsomag segítségével. Ennek a modellnek az alkalmazásával megmutattam, hogy dinamikailag egy központi hely létezik, ahol a szubkritikus Hopf-bifurkációból kivált instabil egyperi-

ódujú határciklus éppen megéri a kapcsoló felületet, mely elválasztja a munkadarab feletti átrepüléshez illetve a forgácsoláshoz tartozó tartományt a végtelen dimenziós fázistérben. Megmutattam, hogy ebből a karcoló (grazing) bifurkációs pontból egy, kettő, négy, három illetve hat periódusú instabil határciklusok válnak ki. Az a tény, hogy mindegyik numerikusan követett bifurkációs ág instabil a karcoló bifurkációs pont közelében, arra utal, hogy ebben a pontban a rendszer dinamikája egy strukturális robbanáson megy keresztül, mely megmagyarázza a bevezetett Big Bang Bifurkáció (B^3) terminológiát. A B^3 pont és a kétperiódusú illetve háromperiódusú pályák egyidejű létezése arra utal, hogy különös attraktor létezik a bi-stabil paraméter zónában. Az alkalmazott numerikus eredményeket az eredeti nem-sima rendszeren végzett időbeli szimuláció segítségével is megerősítettem, mely egyben betekintést engedett a különös attraktor szerkezetébe.

A tézis eredményeit a disszertáció 3. Fejezete tárgyalja.

Kapcsolódó publikációk: [5, 23].

3. Tézis

Továbbfejlesztettem és mérésekkel validáltam a rövid regeneratív hatás egy szabadsági fokú elméleti modelljét, mely alkalmas az úgynevezett folyamatcsillapítás (process damping) leírására. Egy vízszintes esztergagépre kifejlesztett speciális mérési elrendezést alkalmaztam a mérés során, mely alkalmas előre meghatározott módon rezgetni a befogott esztergákést, miközben nagy pontossággal egyidejűleg méri a forgácsoló erőt és a szerszám elmozdulását is. A mérések pontosan kimutatták azt a hiszterézis hatást, melyet a rövid regeneratív modell jól meg a forgácsvastagság változás és a forgácsoló erő változás koordinátarendszerében. Ezzel a rövid regenerációs elmélet kvalitatíve bizonyítottnak tekinthető. A mérések azonban megmutatták, hogy a hiszterézis főirányai eltérnek a statikus forgácsoló erő meredekségétől, ahogy a fázistolást változtatjuk az éppen vágott és a vágandó felület között. Ez az eltérés kicsiny csökkenéssel magyarázható a klasszikus regeneratív határból eredő késésben. Egy mérési sorozat segítségével kísérletileg határoztam meg ezt az eltérést, mely mérhetővé válik, ha az éppen vágott és a vágandó felület között nincsen fázistolás. A továbbfejlesztett rövid regeneratív modell segítségével és a mérési eredményeken alapuló paraméter illesztéssel a megosztó késleltetés súlyfüggvénye közelítőleg meghatározásra került. Ezek alapján a stabilitási térképen kísérletileg is azonosítható volt a folyamatcsillapítás hatása.

A tézis eredményeit a disszertáció 4. Fejezete tárgyalja.

Kapcsolódó publikáció: [14].

4. Tézis

Megalkottam a marószerszámok általános geometriai modelljét olyan marási folyamatok dinamikai vizsgálatára, ahol összetett regeneratív hatás lép fel, mint például hullámos élű marószerszámok alkalmazása esetén. Az elméleti modell segítségével kimutattam, hogy ha az alkalmazott fogankénti előtolás relatíve jelentősen kisebb mint a hullámosság amplitúdója, akkor a diszkrét késések száma megnő a dinamikai rendszerben, és ez csökkenti a regeneratív hatást, azaz növeli a forgácsolási folyamat stabilitását. Azt is megmutattam, hogy növekedő fogankénti előtolás hatására az élek munkadarabbal való érintkezési tartománya megnő, mely a stabilitás csökkenéséhez vezet. Továbbá, az élen lévő hullámosság kétszeres amplitúdójával összevethető fogankénti előtolás esetén a hullámos élű marószerszám a közönséges marószerszám stabilitási viszonyaihoz hasonló. A számítások alapján egy egyszerű mérnöki szabály alkotható, miszerint, a hullámos élű marószerszám stabilitása közel „fogszámszor” nagyobb mint az ugyanolyan, de nem hullámos élű közönséges marószerszám stabilitása. Dinamikai szempontból a hullámos élű marószerszámok „egyélű” marószerszámnak tekinthetők relatíve kis előtolás esetén. Az előzetesen kiszámolt lineáris stabilitási térképet méréssel is ellenőriztük, ahol a hullámos élű marószerszámok előtolás függése pontosan kivehető a kísérleti eredményekből.

A tézis eredményeit a disszertáció 5. Fejezete tárgyalja.

Kapcsolódó publikációk: [1, 4, 8, 12, 15, 17].

5. Tézis

Az időben periodikus paraméteresen gerjesztett rendszer rezgéstani jellemzőjeként definiáltam a „domináns rezgési frekvenciát”, ami a stabilitás vesztés esetén kialakuló rezgés kinetikus energiájának lényeges részét hordozó frekvencia. Megmutattam, hogy ezen domináns rezgési frekvenciák amplitúdója lényegesen nagyobb, mint a többi, elméletileg végtelen sok harmonikus frekvencia erőssége, melyek a Floquet-elmélet szerint a monodromi operátor karakterisztikus multiplikátoraiból számíthatók. Kidolgoztam egy módszert, mely kiválasztja a domináns frekvenciákat a kialakuló kváziperiodikus öngerjesztett rezgés végtelen sok harmonikus közt. A domináns rezgési frekvenciák a stabilitás határán meghatározott kritikus sebességre vonatkozó rezgés Fourier komponensei alapján kerülnek kiválasztásra. Kifejlesztettem egy a szemi-diszkrétizációs eljárással hatékonyan együttműködő numerikus algoritmust, mely az előzőekben ismertetett elméleti eredmények alapján határozza meg a domináns rezgési frekvenciákat a stabilitási határ mentén. A szükséges kritikus karakterisztikus multiplikátorokat a szemi-diszkrétizációs eljárással állítottam elő, mint az átviteli mátrix sajátértékeit. A harmonikusok erősségét az átviteli mátrix kritikus sajátvektorainak periodikus részén elvégzett kis felbontású gyors Fourier transzformáció (FFT) segítségével határoztam meg.

Az előzőleg megjósolt domináns rezgési frekvenciákat marási kísérlettel igazoltam. Az említett frekvenciák a marógép szerkezeti sajátfrekvenciái körül helyezkednek el, de a mérés során kimutattam különleges eseteket, amikor a sajátfrekvenciáktól távol is léteznek domináns rezgési frekvenciák az elméleti számítással megegyező helyen és erősséggel.

A tézis eredményeit a disszertáció 6. Fejezete tárgyalja.
Kapcsolódó publikációk: [6, 13].

6. Tézis

Az első tézis eredményei alapján kifejlesztettem egy dinamikus mérési eljárást, mely alkalmas lehet forgácsolási erő karakterisztikák meghatározására a forgácsvastagság függvényében. A mérés során egy speciálisan megtervezett, egy jellemző sajátfrekvenciával rendelkező felfogató szerkezeten elhelyezett egyedileg megtervezett munkadarabon alkalmaztam telibemarást. A bi-stabil zóna létezése esetén forgácsoló erő karakterisztika nem lehet lineáris. Az előtolás növelésével a bi-stabil zóna méretének változása kizárja a forgácsoló erőnek hatványfüggvénnyel való leírásának is. Az említett mérési eljárás segítségével meghatározott bi-stabil zóna bizonyította az első tézisben megjósolt bi-stabil zóna karakterisztikát és annak előtolásra értelmezett maximumát. Az eredmények dinamikai szempontból megerősítették a Tobias, S.A.⁴ által bevezetett harmadfokú forgácsoló erő karakterisztika alkalmasságát a gyakorlatban gyakran használt forgácsoló erő képletek közül.

A tézis eredményeit a disszertáció 7. Fejezete tárgyalja.
Kapcsolódó publikáció: [7].

7. Tézis

A 4. tézisben bevezetett általános marási modell alapján megalkottam a változó élszögű szerszámok úgynevezett elkent késéses modelljét. Ezen speciális szerszámok geometriai modelljének axiális diszkretizációja segítségével a szemi-diszkretizációs eljárást alkalmaztam a kialakuló nagyszámú konstans késleltetést tartalmazó késleltetett differenciálegyenlet rendszerre és meghatároztuk a megfelelő marási folyamatok lineáris stabilitását. Bebizonyítottam, hogy egy szabadsági fokú dinamika esetén mind a nem-egyenletes konstans élszögű, illetve a harmonikusan változó élszögű marószerszám javítja a lineáris stabilitást a közönséges marószerszámokhoz képest. Hengerszimmetrikus esetben, két közeli módus esetén azonban csak szimmetrikus, erősen megszakított, radiális behatolás esetén tapasztalható jelentősebb javulás a lineáris stabilitási viszonyokban.

A tézis eredményeit a disszertáció 8. Fejezete tárgyalja.
Kapcsolódó publikációk: [9, 16].

⁴Shi, H., and Tobias, S., 1984, Theory of finite-amplitude instability. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 24(1), pp. 45-69

Publikációk

Folyóiratcikkek

- [1] Altintas, Y., Stépán, G., Merdol, D. and Dombóvári, Z.: 2008, Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* **1**(1), 35–44. (ISI 36).
 - [2] Dombóvári, Z., Wilson, R. E., Stépán, G.: 2008, Estimates of the bistable region in metal cutting, *Proceedings of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences* **464**, 3255–3271. (IF = 1.705, ISI 4).
 - [3] Dombóvári, Z., Wilson, R. E., Stépán, G.: 2008, On the robustness of stable turning processes, *International Journal of Machining and Machinability of Materials* **4**(4), 320–334. (ISI 1).
 - [4] Dombóvári, Z., Altintas, Y., Stépán, G.: 2010, The effect of serration on mechanics and stability of milling cutters, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **50**(6), 511–520. (IF=1.919, ISI 8).
 - [5] Dombóvári, Z., Barton, D.A.W., Wilson, R.E., Stépán, G.: 2010, On the Global Dynamics of Chatter in the Orthogonal Cutting Model, *International Journal of Non-Linear Mechanics* **46**(1), 330–338. (IF = 1.388, ISI 7).
 - [6] Dombóvári, Z., Iglesias, A., Zatarain, M., Insperger, T.: 2011, Prediction of Multiple Dominant Chatter Frequencies in Milling Processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **51**(6), 457–464. (IF=1.919, ISI 1).
 - [7] Stépán, G., Dombóvári, Z., Munoa, J.: 2011, Identification of cutting force characteristics based on chatter experiments, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* **60**(1), 113–116. (IF=1.684).
 - [8] Dombóvári, Z., Stépán, G.: 2012, Marószerszámok dinamikai tulajdonságai és azok hatása a megmunkálás stabilitására, *GÉP*, **elfogadva**.
 - [9] Dombóvári, Z., Stépán, G.: 2012, The effect on helix angle variation on milling stability, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **elfogadva**, 1-9. (IF=0.567).
-

Konferencia kiadványok

- [11] Dombóvári, Z., Wilson, R.E., Stépán, G.: 2007, Large Amplitude Non-linear Vibrations in Turning Processes, *6th International Conference on High Speed Machining*, San Sebastián, Baszkföld, Spanyolország, pp. 1–6.
- [12] Dombóvári, Z., Altintas, Y., Stépán, G.: 2009, Stability of Serrated Milling Cutters, *12th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations*, San Sebastián, Baszkföld, Spanyolország, pp. 873–878.
- [13] Dombóvári, Z., Zatarain, M., Insperger, T.: 2010, Dominant Vibration Frequencies in Milling Using Semi-discretisation Method, *2nd International CIRP Conference on Process Machine Interaction (2nd PMI)*, Vancouver, Kanada pp. 1–12.
- [14] Dombóvári, Z., Stépán, G.: 2010, Experimental and Theoretical Study of Distributed Delay in Machining, *Proceedings of 9th IFAC Workshop on Time Delay Systems*, Prága, Cseh Köztársaság pp. 1–12.
- [15] Munoa, J., Dombóvári, Z., Iglesias, A., Stépán, G.: 2010, Estudio de la Estabilidad de las Fresas de Perfil Ondulado.: Study of the Stability of Milling Cutters with Wavy Profile, *18 Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación*, San Sebastián, Baszkföld, Spanyolország, Spain, pp. 1–18.
- [16] Dombóvári, Z., Stépán, G.: 2011, The Effect of Harmonic Helix Angle Variation on Milling Stability, *ASME IDETC/CIE*, Washington, DC, Amerikai Egyesült Államok, pp. 1–7.
- [17] Dombóvári, Z., Munoa, J., Stépán, G.: 2012, General milling stability model for cylindrical tools, *CIRP Conference on Process Machine Interactions (3rd PMI)*, **elfogadva**, Nagoya, Japán, pp. 1–8.

Egyéb konferenciák

- [20] Dombóvári, Z., Wilson, R.E., Stépán, G.: 2007, Large Amplitude Non-linear Vibrations in Regenerative Turning Model, *6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics*, Zürich, Svájc.
 - [21] Dombóvári, Z., Stépán, G., Wilson, R.E.: 2007, Nagysebességű forgácsolás során fellépő öngerjesztett rezgések , *X. Magyar Mechanikai Konferencia*, Miskolc.
-

- [22] Stépán, G., Dombóvári, Z., Wilson, R.E.: 2009, Bi-stable region estimations for cutting, *1st International Colloquium on Non-linear Dynamics of Deep Drilling Systems*, Liege, Belgium, pp. 19–22.
- [23] Dombóvári, Z., Barton, D.A.W., Wilson, R.E., Stépán, G.: 2010, The Fly-over Effect in Regenerative Orthogonal Cutting Model, *DSPDEs'10*, Barcelona, Spanyolország.