

Megszakított esztergálás stabilitásvizsgálata változó fordulatszám alkalmazása mellett

Stability analysis of interrupted turning with variable speed

*HERCZEG Dávid*¹, PhD hallgató, *BACHRATHY Dániel*², egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék, H-1111
Budapest, Műegyetem rkp. 3; Tel.: +36-1463-1369; fax: +36-1463-3471

¹david.herczeg@mm.bme.hu, ²bachrathy@mm.bme.hu

Abstract

Self-excited vibrations (chatter) arising during turning processes significantly deteriorate machining quality and limit the feasible range of technological parameters. Spindle Speed Variation (SSV) is an effective stabilization technique; however, in interrupted cutting operations the process stability strongly depends on the phase difference between the spindle speed modulation and the groove geometry of the workpiece. Since this phase relationship is typically uncontrolled in practical applications, reliable process evaluation requires a robust stability analysis.

This paper presents the development of an experimental measurement system that enables dynamic characterization of the tool-workpiece system, measurement of cutting forces, and the simultaneous investigation of vibrations and variable spindle speed. The desired spindle speed modulation is implemented through speed control with load compensation.

Experimental results highlight the significance of the phase-dependent stabilizing effect of SSV. At the same time, only limited agreement is observed between the measured stability regions and numerical simulations. These findings reveal the limitations of simplified dynamic models and support the necessity of robust stability approaches in interrupted turning processes.

Keywords: Chatter, Robust stability, Variable spindle speed

Kivonat

Az esztergálási folyamatok során fellépő öngerjesztett rezgések (chatter) jelentősen rontják a megmunkálás minőségét és korlátozzák a technológiai paraméterek megválasztását. A változó fordulatszámú megmunkálás (SSV) hatékony stabilizáló módszer, azonban megszakított forgácsolás esetén alkalmazva a folyamat stabilitása a fordulatszám-moduláció és a munkadarab horonygeometriája közötti fáziskülönbségtől is erősen függ. Mivel ez a fázis a gyakorlatban nem szabályozott, a folyamat értékelése robusztus stabilitásvizsgálatot igényel.

A cikk bemutatja egy kísérleti mérőrendszer kialakítását, amely lehetővé teszi a szerszám-munkadarab rendszer dinamikai jellemzését, a forgácsolóerők mérését, valamint a rezgések és a változó fordulatszám egyidejű vizsgálatát. A kívánt fordulatszám-moduláció megvalósítására fordulatszám-vezérlés került alkalmazásra terheléskompenzációval.

A kísérleti vizsgálatok rávilágítanak az SSV fázisfüggő stabilizáló hatásának jelentőségére, ugyanakkor a mért stabilitási tartományok és a numerikus szimulációk között csak korlátozott egyezés figyelhető meg. Ez rámutat a leegyszerűsített dinamikai modell korlátaira, és alátámasztja a robusztus stabilitási megközelítés szükségességét megszakított esztergálás esetén.

Kulcsszavak: Öngerjesztett rezgések, Robusztus stabilitás, Változó fordulatszám

1. BEVEZETÉS

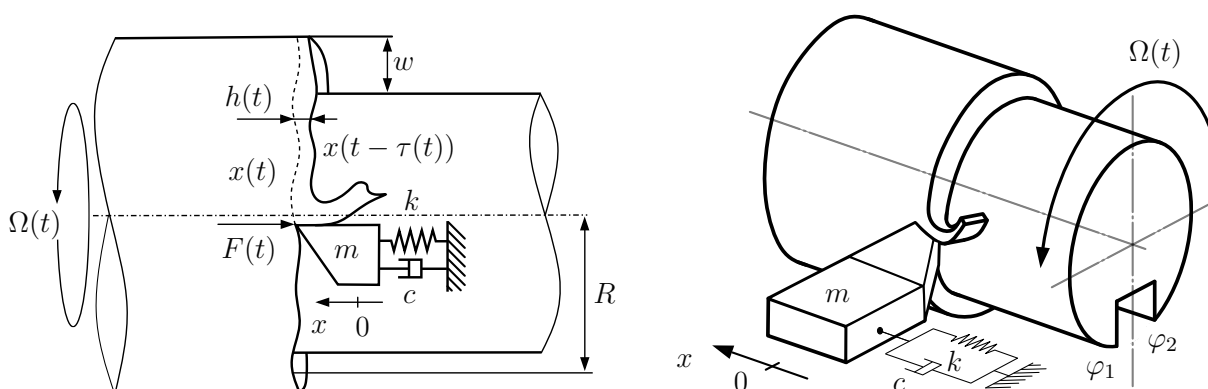
Az esztergálási folyamatok során fellépő öngerjesztett rezgések (chatter) jelentősen rontják a felületi minőséget és korlátozzák az alkalmazható technológiai paramétereket. A jelenség a regeneratív hatásra vezethető vissza: az előző fordulat által a felületen hagyott hullámosság befolyásolja a következő forgácsvastagságát, ami időben késleltetett visszacsatolást eredményez [1][2].

A változó orsófordulatszám (Spindle Speed Variation, SSV) alkalmazása ismert stabilizáló eljárás [3][4], amely megbontja a regeneratív hatáshoz szükséges fázisviszonyokat. A módszer tipikusan szinuszos moduláció formájában valósul meg, ahol az RVA (relatív amplitúdó) és az RVF (relatív frekvencia) paraméterek írják le a fordulatszám időbeli változását [5][6].

Megszakított forgácsolás esetén, amikor a szerszám periodikusan elhagyja a munkadarabot, a folyamat stabilitása a fordulatszám-moduláció és a horonygeometria közötti fáziskapcsolattól is erősen függ [7][8]. Mivel ez a fáziseltolódás a gyakorlatban nem szabályozott, a folyamat értékelése robusztus stabilitásvizsgálatot igényel [9].

Jelen cikk célja egy kísérleti mérőrendszer bemutatása, amely alkalmas a szerszám-munkadarab rendszer dinamikai jellemzésére, a forgácsolóerők mérésére, valamint a változó fordulatszám stabilitásra gyakorolt hatásának vizsgálatára, különös tekintettel a fordulatszám-vezérlés gyakorlati megvalósításának kihívásaira.

2. MECHANIKAI MODELL



1. ábra. A megszakított esztergálás egyszabadságfokú mechanikai modellje.

A szerszám-munkadarab rendszer dinamikai viselkedését egyszabadságfokú (1 DoF) lineáris rezgőrendszerrel modelleztük (1. ábra). A modellt a fő rezgésirányban értelmezett effektív tömeg-rugó-csillapítás rendszert reprezentálja:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -F(t), \quad (1)$$

ahol m , c és k a rendszer modális paraméterei, $F(t)$ pedig a forgácsolóerő. A változó orsófordulatszám szinuszos modulációval került bevezetésre:

$$n(t) = n_0 \left[1 + \text{RVA} \sin \left(2\pi \text{RVF} \frac{n_0}{60} t \right) \right], \quad (2)$$

ahol az RVA a relatív amplitúdót, az RVF pedig a relatív modulációs frekvenciát jelöli. Lineáris erőkarakterisztikát feltételezve a rendszert leíró differenciálegyenlet:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = -\omega_n^2\frac{Kw}{k}(h_0(\tau(t)) + x(t) - x(t - \tau(t)))g(\varphi(t)), \quad (3)$$

ahol ω_n és ζ a sajátkörfrekvencia és relatív csillapítás, w a fogásmélység, h_0 a nominális forgácsvastagság, K a forgácsolási együttható, míg $\tau(t)$ a változó fordulatszámából adódó időfüggő késleltetés [1]. Megszakított forgácsolás esetén a horony hatását a

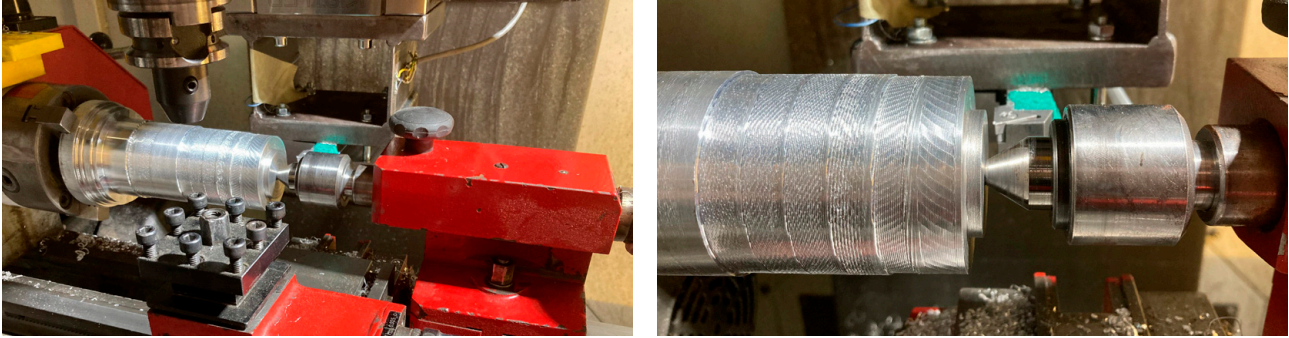
$$g(\varphi(t)) = \begin{cases} 0, & \text{ha } \varphi_1 \leq \text{mod}2\pi \leq \varphi_2, \\ 1, & \text{másképp,} \end{cases} \quad (4)$$

kapcsolófüggvény írja le. A kísérleti eredményeket numerikus szimulációkkal is összehasonlítottuk; a szimulációs modell és az alkalmazott numerikus stabilitásanalízis részletes ismertetését a terjedelem korlátai miatt itt nem tárgyaljuk.

3. KÍSÉRLETI MÉRŐRENDSZER ÉS MÓDSZERTAN

A kísérleteket egy CNC gépbe integrált, kísérleti célra kialakított esztergáló egységen végeztük, háromkomponensű piezoelektromos dinamométer és gyorsulásérzékelő alkalmazásával. Az erő-, rezgés- és fordulatszámjeleket szinkronizált adatgyűjtő rendszer rögzítette. A változó fordulatszámú vizsgálatok során a

kívánt orsófordulatszámot szinuszos modulációval írtuk elő. A nagy mintavételezési frekvencia ($f_s = 51200$ Hz) alkalmazása elengedhetetlen volt a nagyfrekvenciás dinamikus erőkomponensek és a modulált fordulatszám okozta jellemzők pontos rögzítéséhez. A gyorsulásérzékelőt a munkadarab befogásának közvetlen közelében helyeztük el. A mérési berendezést a 2. ábra valamint annak sematikus rajzát a 3. jobb oldali ábra mutatja.

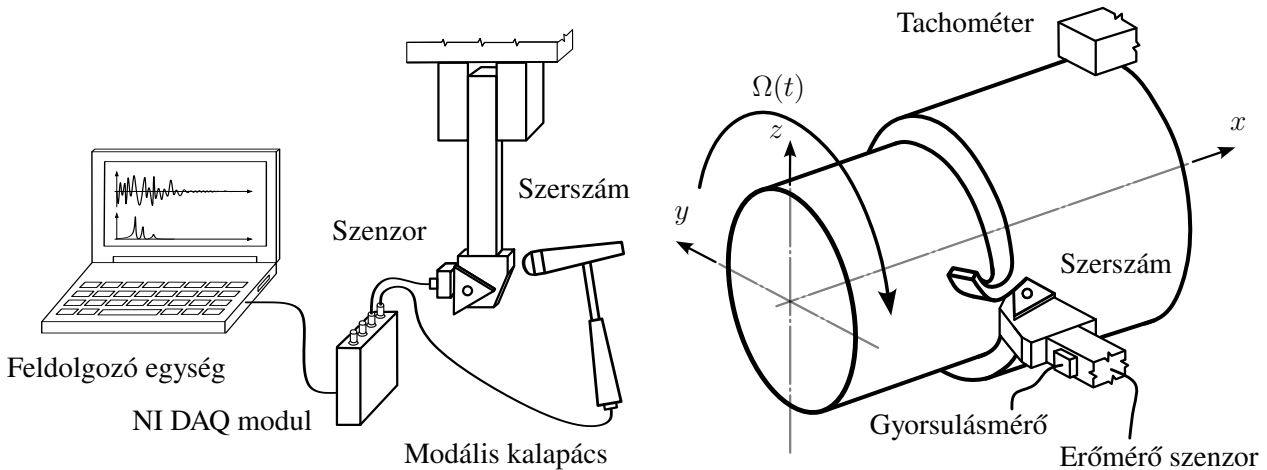


2. ábra. Mérési berendezés az erőkarakterisztika és stabilitási tesztek elvégzéséhez.

A szerszám-munkadarab rendszer modális paramétereit modális analízissel határoztuk meg a 3. bal oldali ábra alapján. Az így nyert domináns sajátfrekvencia, csillapítás és dinamikai merevség a következőknek adódott

$$f_n = 220 \text{ Hz}, \quad \zeta = 1.07 \%, \quad k = 5.7 \cdot 10^6 \text{ N/m}, \quad (5)$$

melyeket az egyszabadságfokú modell paraméterezéséhez használtuk.



3. ábra. Modális analízis (bal) és erőkarakterisztika mérés (jobb) sematikus ábrája.

Az orsó hajtáslánca a redukált tehetetlenség miatt tárolós rendszerként viselkedik:

$$\Theta_{\text{red}} \frac{2\pi}{60} \dot{n}_r = M_{\text{motor}} - M_{\text{load}}, \quad M_{\text{motor}} = k_p (n_d - n_r). \quad (6)$$

Ahol $n_d(t)$ a megkívánt, $n_r(t)$ pedig a megvalósult fordulatszám. A zárt hurkú dinamika elsőrendű rendszerrel közelíthető:

$$\dot{n}_r = b(n_d - n_r), \quad (7)$$

ahol a terhelésmentes lépésválasz-mérések alapján $b = 5.54 \text{ s}^{-1}$ (lásd 4. ábra bal oldala). A megfelelő követés érdekében előreccsatolt (feedforward) kompenzációt alkalmaztunk. A rendszer átviteli függvénye ($G_{\text{open}}(\omega)$) és a hozzá tartozó ideális kompenzátor ($G_{\text{comp}}(\omega)$):

$$G_{\text{open}}(\omega) = \frac{b}{i\omega + b}, \quad G_{\text{comp}}(\omega) = \frac{i\omega + b}{b}. \quad (8)$$

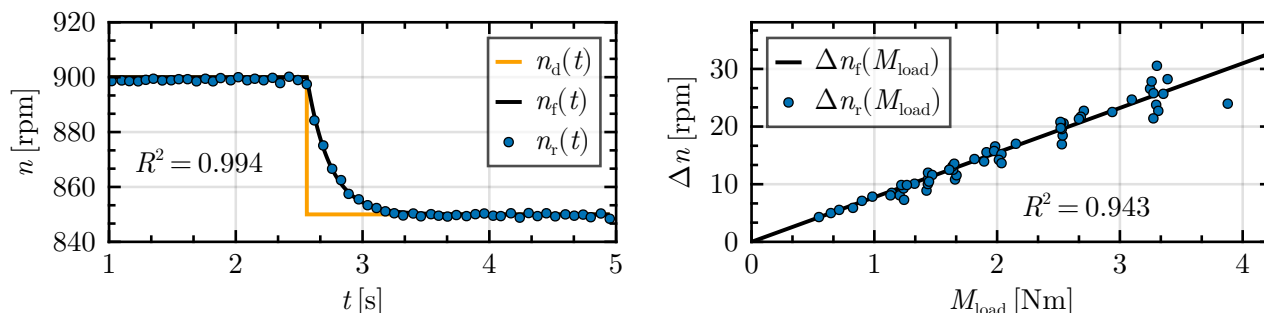
Megmunkálás során azonban a terhelőnyomaték ($M_{\text{load}}(t)$) hatását is figyelembe véve a szükséges kivezért fordulatszám:

$$n_n(t) = n_d(t) + \frac{1}{b} \dot{n}_d(t) + \frac{1}{b\Theta_{\text{red}}} \frac{2\pi}{60} M_{\text{load}}(t). \quad (9)$$

A gyakorlatban a terhelés-fordulatszám kapcsolatot ($\Theta_{\text{red}} = 0.224 \text{ kgm}^2$) előzetes mérések alapján azonosítottuk (lásd 4. ábra jobb oldala), és az így kapott empirikus korrekciót alkalmaztuk:

$$n_n(t) = n_d(t) + \frac{1}{b} \dot{n}_d(t) + \Delta n(M_{\text{load}}). \quad (10)$$

Ez a struktúra lehetővé tette a kívánt fordulatszám pontos követését terhelés alatt is.



4. ábra. Időálló (bal) és fordulatszám esés (jobb) mérése a fordulatszám vezérlés megvalósításához.

A stabil vágási kísérletek alapján meghatároztuk a forgácsolóerő lineáris közelítését [10][11]. A mért tangenciális és axiális erőkomponensek jó közelítéssel lineárisan arányosnak adódtak a forgácsvastagság és a fogásmélység szorzatával (lásd 5. ábra):

$$F_a(w, h) = K_a w h, \quad F_t(w, h) = K_t w h, \quad (11)$$

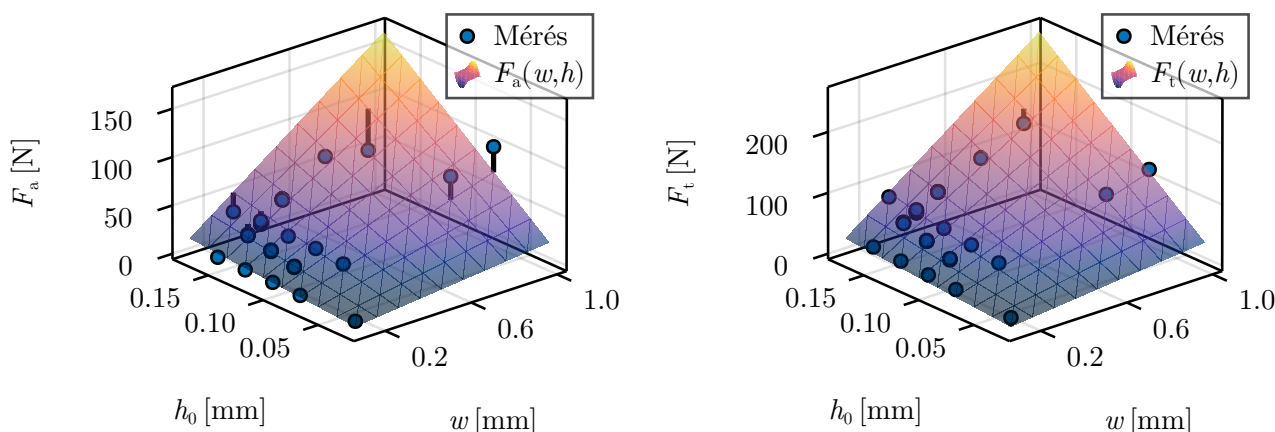
amelyből a következő forgácsolási együtthatók adódtak

$$K_a = 931.1 \text{ MPa}, \quad K_t = 1491.1 \text{ MPa}. \quad (12)$$

Az azonosított tangenciális erőmodell lehetővé tette a terhelőnyomaték előzetes becslését adott fogásmélység és fordulatszám mellett, és így a fordulatszám vezérlés során a (10) egyenletben szereplő $\Delta n(M_{\text{load}})$ tagot nem csupán empirikusan, hanem mért erőkarakteristika alapján prediktálhattuk a következő módon

$$M_{\text{load}}(t) = R F_t(t) = R K_t w h_0(t), \quad (13)$$

ahol R az 1. bal oldali ábrán szemléltetett távolság.



5. ábra. Illesztett axiális (bal) és tangenciális (jobb) erőkarakteristikák a mérési pontokkal.

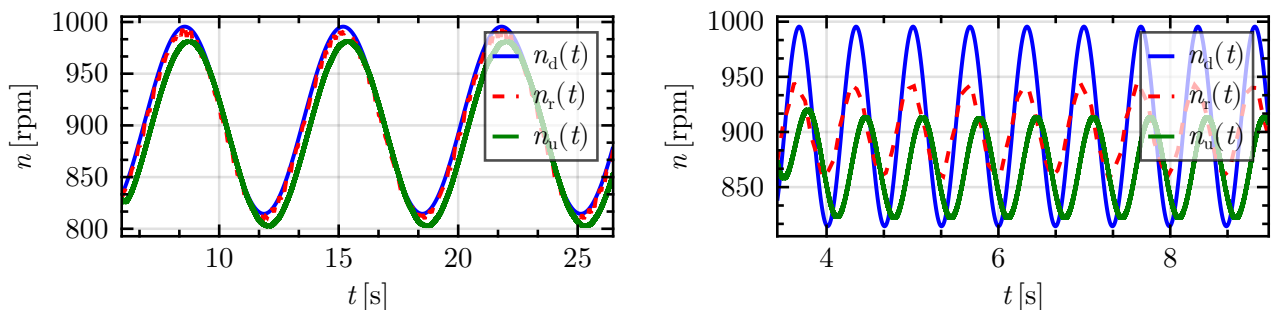
Ezzel a megközelítéssel egy egyszerű elsőrendű orsómodellre épülő mérőberendezéssel is megfelelő pontosságú fordulatszám-követés volt biztosítható terhelés alatt, anélkül hogy komplexebb hajtásdinamikai modellre lett volna szükség.

4. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉS

4.1. Fordulatszám-követés vizsgálata

A fordulatszám-vezérlés hatékonyságát a kívánt és a tényleges fordulatszám időfüggvényének összehasonlításával értékeltük. A 6. ábra bal oldalán jól látható, hogy kis és közepes fogásmélység esetén az előrecsatolt kompenzációnak köszönhető megvalósult fordulatszám megfelelően követi a kívánt szinuszos jelet. Ezzel szemben a kompenzálatlan esetben ($n_u(t)$) fáziskésés és amplitúdóhiba figyelhető meg, ami jól szemlélteti a terheléskompenzáció szükségességét.

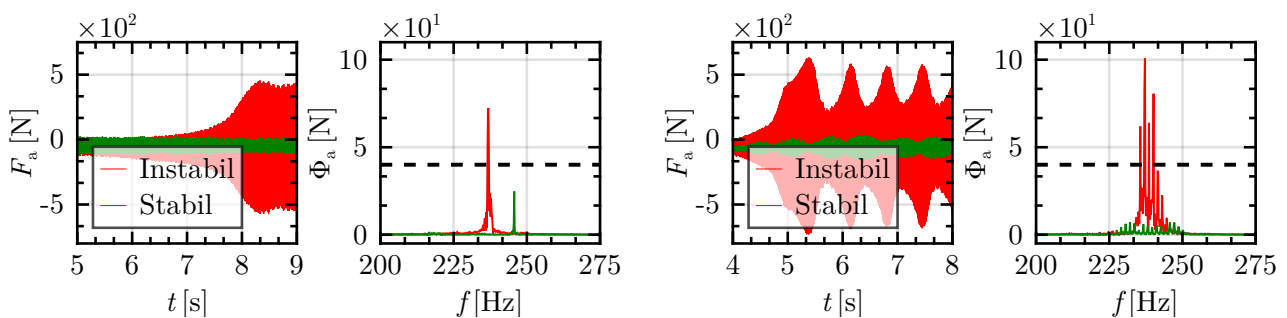
Nagyobb fogásmélység ($w > 1 \text{ mm}$) vagy nagyobb modulációs frekvencia ($RVF > 1/10$) esetén azonban a rendszer fizikai korlátai érvényesülnek. A 6. ábra jobb oldali része rávilágít arra, hogy a növekvő terhelőnyomaték és a motor véges dinamikája miatt a megvalósult fordulatszám-amplitúdó elmarad az előírt értéktől. Ez a jelenség a gyakorlatban megvalósítható modulációs tartomány felső határát jelöli ki. Az eredmények összhangban vannak az orsó elsőrendű dinamikai modelljéből és a terhelésbecslésből adódó korlátokkal.



6. ábra. Előírt (n_d), megvalósult (n_r) és kompenzálatlan (n_u) fordulatszám értékek SSV alkalmazása mellett; $RVA=0.1, RVF=1/100$ (bal) és $RVA=0.1, RVF=1/10$ (jobb).

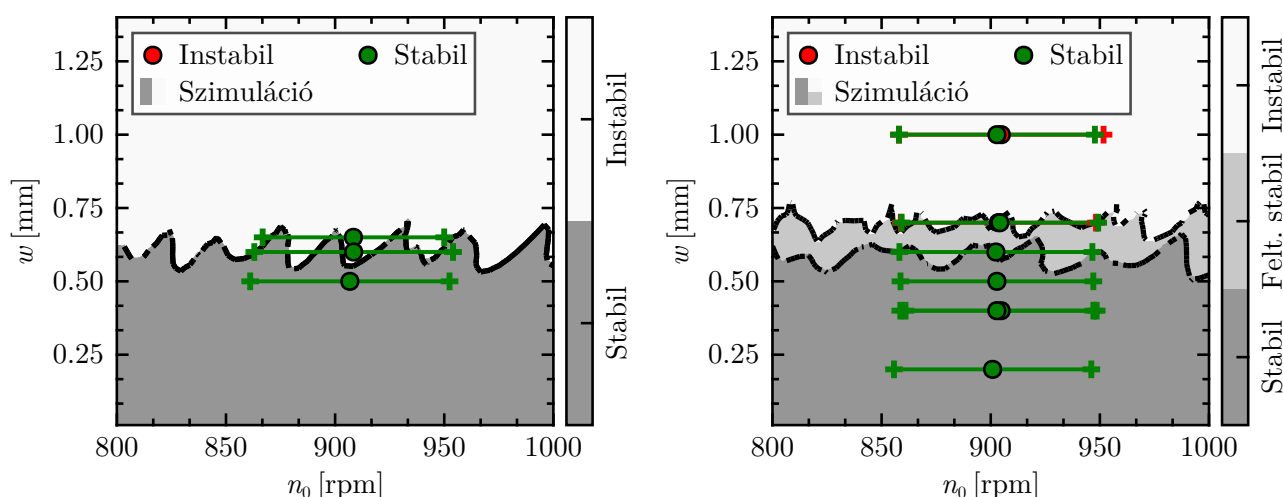
4.2. Stabilitási vizsgálatok

Az instabilitás határát az axiális erőjel spektrumában megjelenő, a szerszám domináns sajátfrekvenciája (kb. 220 Hz) közelében fellépő csúcs amplitúdója alapján határoztuk meg. Az empirikusan megállapított 40 N-os küszöb (fekete szaggatott vonal a 7. ábrán) jól elkülönítette a hallhatóan stabil és instabil megmunkálásokat. Az SSV alkalmazásával a fordulatszám változtatásának hatása közvetlenül látszik az erőjeleken, és a spektrumban is modulációként jelenik meg.



7. ábra. Axiális erőjelek és azok Fourier-transzformáltja stabil és instabil vágás esetén: a konstans fordulatszám (bal), valamint SSV alkalmazása mellett (jobb). Az empirikus chatter amplitúdót fekete szaggatott vonal jelzi.

A stabilitási kísérletek során különböző modulációs paraméterek és fogásmélységek mellett határoztuk meg a kritikus stabilitási határt, valamint megszakított esztergálás esetén a stabil és feltételesen stabil tartomány határait. Az összehasonlítás az egyszabadságfokú (1 DoF) modell alapján számított stabilitási térképpel (lásd 8. ábra) jelentős eltéréseket mutatott, ami arra utal, hogy az egyszerű modell nem ad teljes körű leírást a rendszer dinamikájáról. Nem sikerült egyértelműen meghatározni az instabilitási határt, mivel a motor teljesítményének korlátai miatt bizonyos paraméterek mellett a viselkedés nem volt mérhető. A mérések azonban megerősítették, hogy a változó fordulatszám bizonyos tartományokban stabilizáló hatású lehet, bár a gyakorlati alkalmazást a hajtásdinamika és a terhelési feltételek korlátozzák.



8. ábra. Stabilitási mérési pontok összehasonlítása a szimulációval készített térképekkel $RVF=1/10$ és $RVA=0.1$ esetén megszakítás nélkül (bal) és megszakítással (jobb) $\Delta\varphi=31^\circ$ szélességű horony mellett.

5. KONKLÚZIÓ

A cikkben bemutatott változó fordulatszámú, megszakított esztergálás kísérleti vizsgálatához kialakított mérőrendszert, valamint az orsódinamika és a forgácsolóerő-paraméterek azonosításának módszerét. Az erőkarakterisztika alapján lehetővé vált a terhelőnyomaték előzetes becslése és a fordulatszám előrecsatolt kompenzációja, amely mérsékelt terhelés mellett megfelelő követési pontosságot biztosított.

A stabilitási vizsgálatok azonban nem mutattak teljes egyezést a szimulációs eredményekkel. A berendezés teljesítménykorlátai miatt a nagyobb fogásmélységekhez és modulációs amplitúdókhoz tartozó instabil tartományok kísérletileg nem voltak elérhetők, így a számított instabil régiók egy része nem volt validálható. A mérések rámutattak, hogy a hajtásdinamika és a teljesítménykorlátok meghatározóak, ezért a további vizsgálatokhoz nagyobb dinamikai sáv szélességű és teljesítményű hajtásrendszer szükséges.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA FK 138500 számú projekt keretében.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Tobias SA. *Machine-Tool Vibration*. London: Blackie & Son; 1965.
- [2] Altintas Y, Weck M. *Chatter stability of metal cutting and grinding*. CIRP Annals. 2004;53(2):619–642.
- [3] Takemura T, Kitamura T, Hoshi T, Okushimo K. *Active suppression of chatter by programmed variation of spindle speed*. CIRP Ann Manuf Technol. 1974;23(1):121–122.
- [4] Inamura T, Sata T. *Stability analysis of cutting under varying spindle speed*. CIRP Ann Manuf Technol. 1974;23(1):119–120.
- [5] Insperger T, Stépán G. *Stability analysis of turning with periodic spindle speed modulation via semidiscretization*. Journal of Vibration and Control. 2004;10(12):1835–1855.
- [6] Albertelli P, Chiappini E, Monno M, Sortino M. *Development of generalized tool life model for constant and variable cutting conditions (including SSV)*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022;120(1-2):1–18.
- [7] Szalai R, Stépán G. *Lobes and ladders in the stability chart of interrupted turning*. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. 2006;1(3):205–211.
- [8] Fodor G, Sykora HT, Bachrathy D. *Stochastic modeling of the cutting force in turning processes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;111(1-2):213–226.
- [9] Bachrathy D. *Robust stability limit of delayed dynamical systems*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2015;59(2):74–80.
- [10] Hajdu D, Astarloa A, Kovács I, Dombóvári Z. *The curved uncut chip thickness model: A general geometric model for mechanistic cutting force predictions*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2023;188:104019.
- [11] Budak E, Altintas Y. *Analytical prediction of chatter stability in milling—Part I: General formulation*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1998;120(4):655–662.