

# Szerszámgéprezgések csillapítása passzív piezoelektromos rendszerrel

## A case study of vibration mitigation of metal cutting processes by piezoelectirc actuation

GÁBOS Zoltán<sup>1</sup>, PhD hallgató, DOMBÓVÁRI Zoltán<sup>2</sup>, PhD, egyetemi docens

<sup>1</sup>MTA-BME Lendület Szerszámgéprezgések Kutatócsoport,  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék,  
Cím: H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. Telefon: +36 1 463 1369, Fax: +36 1 463-1369,  
E-mail cím: zoltan.gabos@mm.bme.hu, Honlap: <https://www.mm.bme.hu/>

<sup>2</sup>MTA-BME Lendület Szerszámgéprezgések Kutatócsoport,  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék,  
Cím: H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. Telefon: +36 1 463 1369, Fax: +36 1 463-1369,  
E-mail cím: dombovari@mm.bme.hu, Honlap: <https://www.mm.bme.hu/>

### Abstract

*Regenerative vibration can cause undesired surface roughness and strong structural vibration in the machine tool during cutting processes. A popular method to overcome this problem is the application of tuned mass dampers (TMD). This study introduces the theory and the application method of an electromechanical TMD, where the electronical part is represented by a piezoelectric actuator embedded into the clamping and by its electric circuit.*

**Keywords:** piezoelectric actuator, machine tool vibration, tuned mass damper, receptance coupling

### Kivonat

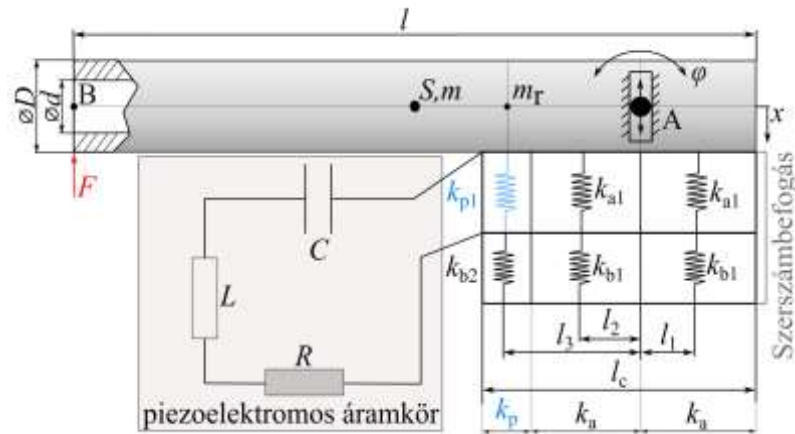
*Szerszámgépek működése során komoly rezgéstani problémákat és a felület minőségének romlását okozhatják az úgynevezett regeneratív rezgések. Ennek elkerülésére, csillapítására egy megoldás lehet a hangolt passzív lengésfojtók (TMD) alkalmazása. A tanulmány során bemutatott módszer egy elektromechanikai TMD működését és alkalmazhatóságát ismerteti, ahol az elektronikai részt a szerszámgép befogásába beépített piezoelektromos aktuátor és annak áramköre képezi.*

**Kulcsszavak:** piezoelektromos aktuátor, szerszámgép rezgések, hangolt passzív lengésfojtó, receptancia illesztés

## 1. BEVEZETÉS

A forgácsoló megmunkálások során nagy energiájú rezgések keletkezhetnek a szerszámgépekben, melyek elégtelen felületi minőséget és esetenként töréseket okozhatnak, mind a munkadarabban, mind a szerszámgép felépítményben. Megmunkált felületszegmensre vonatkoztatott visszatérő mozgás hatására visszacsatolás keletkezik a forgácsoló erőn keresztül, melynek hatására kialakulhatnak úgynevezett regeneratív rezgések, melyek nagy amplitúdójú rezgések formájában kellemetlen zaj mellett ismerhetők fel. Ezt a kellemetlen rezgést hívják az angol szakirodalomban megtalálható „chatter” jelenségnek [1]. A szerszámgépek általánosságban kifejezetten merev szerkezetek és alacsony a relatív csillapításuk. Ennek következtében gyakori a regeneratív rezgések kialakulása a rosszul megválasztott forgácsolási paramétereknek köszönhetően (például forgácsolási mélység, illetve sebesség). Sokféle eljárás létezik a nem kívánt rezgések csillapítására annak érdekében, hogy szélesebb legyen a stabil paraméterek köre megmunkálás során. Az egyik módszer az úgy nevezett "hangolt passzív lengésfojtó" (angol nevén tuned mass damper: TMD), amely az eredeti rendszerhez hozzákapcsolt tömeggel hangolja el az összetett rendszer rezonanciáját [2]. Merev dinamikával rendelkező rendszerek csillapítása esetén nagyobb hozzáadott tömegre van szükség, hogy a TMD csillapítás megfelelően működjön. Azonban a nagyobb tömeg általában nagyobb fizikai méretekkel jár, amely egy igen nagy hátráltató tényező a módszer alkalmazása során. Hiszen mint a legtöbb ipari probléma során, itt is igaz, hogy a rendelkezésre álló hely korlátozott.

Az elmúlt évtizedek során, a piezoelektromos anyagok (például ólom-cirkónát-titanát: PZT) egyre inkább előtérbe kerülnek a rezgés csillapítási módszerek terén. Ugyan is a PZT anyagok passzív, illetve aktív szabályozási környezetben való alkalmazása igen eredményesnek bizonyult. Kompakt és adaptív megoldást nyújt versenytársaival szemben, és akár több rezgésmódot is lehet egy TMD-vel csillapítani. Ez igaz mind a passzív és aktív rendszerekre is [3]. A tanulmány bemutatja az analitikus modell levezetését egy passzív elektromechanikai TMD rendszerre, amely egy rezgés módot csillapít. A TMD rendszert a szerszámgép és egy piezoelektromos aktuátor alkotja, amely a szerszámtartó eszközbe van beleágyazva. Továbbá bemutat egy receptancia illesztéshez (angolul „receptance coupling”) használt modellt is, mely lehetővé teszi a csillapítási módszer alkalmazhatóságát tetszőleges szerszámgeometriák esetére is.



1. ábra. Egyszerűsített furatesztergálás modell a hozzáadott piezoelektromos passzív áramkörrel.  $x$  és  $\varphi$  jelölik a laterális és rotációs szabadnak feltételezett mozgáslehetőségeket. Az  $S$  jelzi a szerszám tömegközéppontját. A szerszámbefogás jól látható módon rugókkal van modellezve, ahol  $p$  jelöli a piezoelektromos egységeket, amíg  $a$  és  $b$  az eredeti befogás anyagát jelöli különböző méretekkkel. Az áramkör egy kapacitív ( $C$ ), egy induktív ( $L$ ) és egy rezisztív ( $R$ ) elemből áll. Az  $m_r$  tömeg jelöli a rúd redukált tömegét a piezoelektromos aktuátor hatásvonalában. Az  $l$  hosszok jelölik az egyes rugó oszlopok erőkarjait a nyomaték számításához.

A modell felépítése, a TMD rendszerek és az elektromechanikus analógiák elméletén alapszik. Ahogy azt az 1. ábra mutatja, a tanulmány során használt szerszámgeometria egy végig üreges csőből áll, amely megmunkálja a munkadarab belső furat felületét. A piezoelektromos aktuátor a szerszámbefogásának módosításával helyezhető el a rendszerbe. Mivel a módosítás anyageltávolítással jár, melynek a helyére egy kevésbé merev anyag kerül, a szerszámgép dinamikai tulajdonságai jelentősen megváltozhatnak a lecsereált anyag méreteinek függvényében. A módosított szerszámbefogás modellezhető rugókkal az egyes részei méretének és anyagának figyelembevételével. Ennek következtében a rendszer mozgásegyenlete levezethető, amely 2 szabadságfokú (DOF). A lehetséges mozgások az  $x$  irányú laterális mozgás és az  $A$  pont körüli forgás.

Az elektronikai része a rendszernek egy teljesen passzív LRC áramkör, amelynek működése a mechanikai rendszerhez kapcsolva, a piezoelektromos aktuátoron keresztül megfigelthető egy TMD rendszernek. A cél az, hogy a szerszám végén keletkező, forgácsolásból származó lehető legtöbb energiát átvezessük az áramkör rezgésébe. Ennek hatására a szerszám rezgése mérséklődik rezgési módusában. Fontos megjegyezni, hogy ez nem energia disszipáció, bár az is szerepet játszik. A megtervezett áramkör, áramköri rezgési módusa kerül rezgésbe, relatíve átvéve a dominanciát a szerszám mechanikai rezgési módusától, a mechanikai energia átvezetésének hatására. Ennek hatására a „csillapítani” kívánt szerszám rezgése minimális.

## 2. MODELL FELÉPÍTÉSE

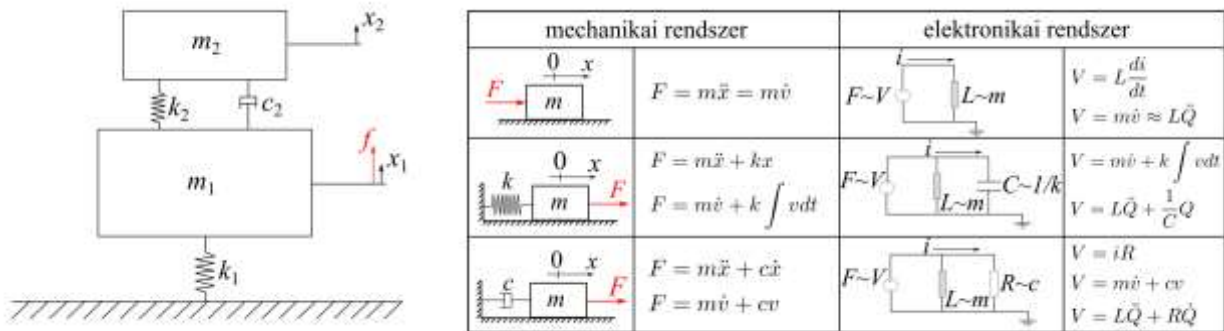
A mechanikai mozgásegyenlet levezethető az 1. ábra alapján, amelynek eredményeként egy két szabadságfokú lengő rendszert kapunk:

$$\begin{bmatrix} m_A & 0 \\ 0 & \Theta_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_a + k_p & k_a(l_2 - l_1) + k_p l_3 \\ k_a(l_2 - l_1) + k_p l_3 & k_a(l_2^2 + l_1^2) + k_p l_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{x}\varphi l_s \sin(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F(t) \\ l_{exc} F(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ahol  $m_A$  és  $\Theta_A$  az  $A$  pontba redukált tömeg és tehetetlenségi nyomaték,  $k_a$  és  $k_p$  a befogást modellező egyes részek merevségei,  $l_1$ ,  $l_2$  és  $l_3$  az 1. ábrán látható rugókhöz tartozó távolságok,  $l_s$  az  $A$  pont és a súlypont

távolsága,  $l_{exc}$  az A pont és a gerjesztési pont távolsága,  $F(t)$  a gerjesztési erő, végül  $x$  és  $\varphi$  a két szabadságfoka a lengésnek. A nemlineáris tagot zérusnak tekinthetjük kis lengésekre, ezzel linearizálva a mozgásegyenletet.

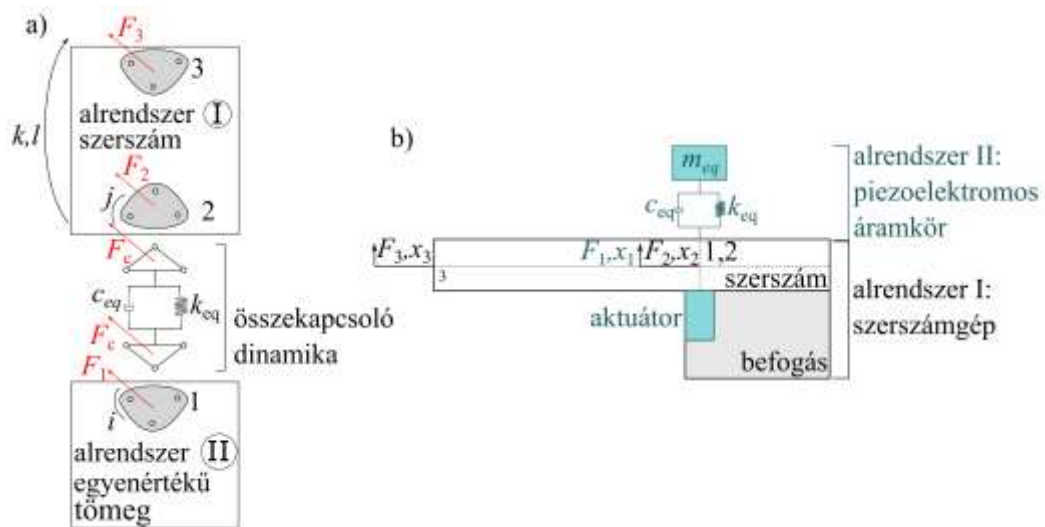
A dominánsnak vélt rezgésmódja a rendszernek az A pont körüli forgás, mivel az  $x$  irányú translációs mozgás kisebb amplitúdó nagyítást produkál. Ennek következtében, a továbbiakban csak az A pont körüli forgást vesszük figyelembe, amely egy 1 DOF rendszert eredményez.



2. ábra Baloldal: Hangolt passzív lengésfojtó (TMD) modell. Jobboldal: Elektromechanikai analógiák.

Az egyszerűsített, egyszabadságfokú mozgásegyenlethez hozzákapcsolható a lengésfojtó tömege ( $m_2$ ), így alkotva egy kéttömegű lengő rendszert, ahol a szögelfordulás átírható laterális elmozdulássá geometriai megfontolások következtében. Az így alkotott TMD rendszer a 2. ábrán látható módon vizualizálható, amelynek dinamikai tulajdonságait és azoknak optimalizációját jól összefoglalja [2]. A TMD paraméterek optimalizációja elvégezhető a [2]-ben említett és bemutatott módszerek alapján, és a megfelelő elektromechanikai analógiák (2. ábra) használatával felírható az elektromechanikai rendszer mozgásegyenlete.

Annak érdekében, hogy a módszert gyakorlati környezetben pontosan alkalmazhassuk, érdemes az úgy nevezett receptancia illesztés módszert használni, hogy pontosan tudjuk számolni az optimális paramétereket. Ezzel matematikailag lehetséges módosítani a mért eszközt, így a geometria pontos ismerete és a drága felszerelés módosítása előtt képesek vagyunk meghatározni az optimális paramétereket. A szerszámgép és a piezoelektromos áramkör kapcsolatának receptancia illesztés modelljét a 3. ábra mutatja be.

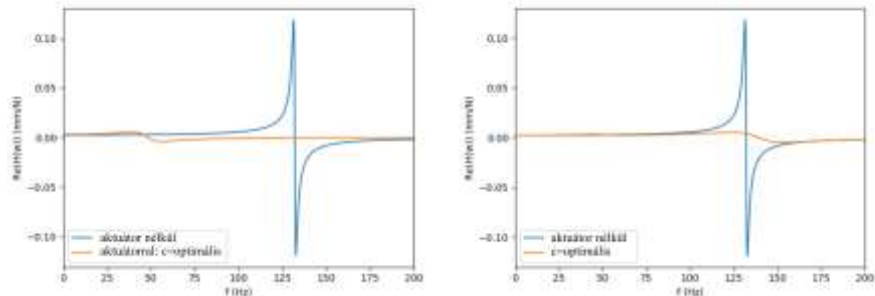


3. ábra Receptancia illesztés modellje: (a) egy egyszerűsített reprezentatív modell a két alrendszer kapcsolatának vizualizációjára, (b) bemutatja a két rendszer összekapcsolásának fizikai elképzelését. Az összekapcsoló elem leírja a két alrendszer közötti erő kapcsolat ( $F_c$ ) és az elem (áramkör) paraméterei. Ez a kapcsolat biztosítja a megfelelő működését a TMD rendszernek.

A 3. ábra alapján fel lehet építeni a receptancia illesztés modelljét, amely tartalmazza a szerszám mért és számított frekvencia átviteli függvényeit. Tehát, amennyiben lehet mérni a szerszámgép egyes részeinek módosítás előtti dinamikai tulajdonságait és ki tudjuk számolni az áramkör lengését, akkor az optimális paraméterek pontos számítása lehetséges még a módosítások megkezdése előtt.

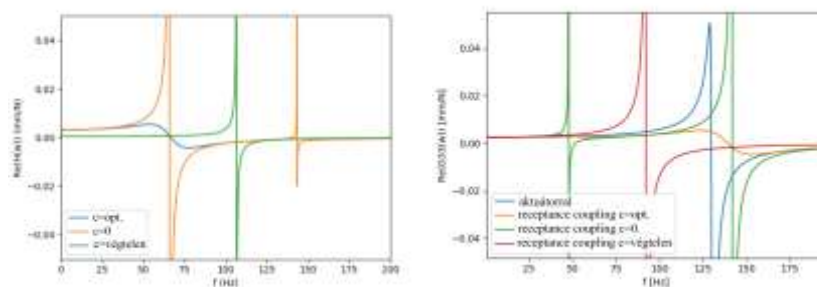
### 3. EREDMÉNYEK

Mind az elméleti, mind a receptancia illesztés modellel nagy mértékű válaszbéli csökkenés érhető el. Ezen eredményeket jól mutatja be a 4. ábra, ahol látható a módosíthatlan szerszámgéphez képest az elektromechanikai TMD által csillapított átviteli függvény.



4. ábra Az optimalizált elektromechanikai TMD rendszer (sárga görbe) összehasonlítása az 1 DOF egyszerűsített módosíthatlan szerszámgép modellel (kék görbe). Míg a baloldalon látható az egyszerűsített elméleti modell alkalmazásával elérhető eredmény, a jobboldalon látható a receptancia illesztés modellel elért válasz látható. Mind a két eset drasztikus javulást mutat a szerszámgép rezgésének csökkentése terén.

Az 5. ábra belátást nyújt a pontos optimális paraméterek megtalálásának fontosságába, bemutatva a szélsőséges helyzeteket mind az elméleti és receptancia illesztés módszer esetére.



5. ábra Baloldal: Az elméleti modell szélsőséges paramétereinek hatása. Jobboldal: A receptancia illesztés modell szélsőséges paramétereinek hatása.

Ezen biztató eredmények motivációt adhatnak, ilyen piezoelektromos rendszerek valós környezetben való alkalmazásához, amely során egy szerszámgép rezgéseit célunk csillapítani és ezzel a megmunkálás minőségét javítani.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző részvételét az OGÉT 2021 konferencián az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő NTP-HHTDK-20 pályázata támogatta.

Ez a kutatás a Magyarország Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalának támogatásával készült az NKFI FK 124361 és az EUROSTARS FORTH E!12998 kutatási projektek keretében.

This research was supported by the Hungarian Government in the framework of NKFI FK124361 research project and EUROSTARS FORTH E!12998.

### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Tobias, S. A. *Machine Tool Vibration*, Blackie, London, 1965.
- [2] Munoa, J., Beudaert X., Dombóvári Z., Altintas Y., Budak E. Brecher C., Stépán G. *Chatter suppression techniques in metal cutting*. CRIP Annals, 2016, 65, 785-808.
- [3] Reza Moheimani S.O., Fleming A. J. *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. Springer, London, 2006.