

FŰSZEGÉLYNYÍRÓ REZGÉSVIZSGÁLATA

Szabó Tamás

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet
Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: szabo.tamas@uni-miskolc.hu

Rónai László

tanársegéd, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet
Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: ronai.laszlo@uni-miskolc.hu

Lénárt József

tanársegéd, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet
Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: lenart.jozsef@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A cikk egy fűszegélynyíró lehetséges rezgésforrásainak feltárásával foglalkozik. Ezen belül részletesen tárgyalja a damil, mint feszített húr lineáris rezgéstani végeselemes egyenleteit. A nagy sebességgel forgó damil örvényleválásait a Strouhal szám, illetve rezgéstani képlet segítségével vizsgálja. A berendezés többi rezgésforrásait méréssel analizálja. Optikai mérési módszerrel meghatározásra kerül a működési fordulatszám és egy lézeres mérőeszközzel az elmozdulás-idő regisztrátum, amelyet Gyors Fourier Transzformációval elemzünk.

Kulcsszavak: rezgésvizsgálat, sajátfrekvencia, FFT, feszített húr

Abstract

This paper explores the possible sources of vibration in a strimmer. Within this, the linear vibrational finite element equations of a strimmer line as a taut string are discussed in detail. The vortex detachments of the high-speed strimmer line are examined using the Strouhal number and the vibrational formula. The other vibration sources of the device are analysed by measurements. An optical method is used to determine the revolution per minute. The displacement-time curve is measured with a laser triangulation device, which is analysed by Fast Fourier Transform.

Keywords: vibration analysis, natural frequency, FFT, taut string

1. Bevezetés

A háztartási eszközökkel szemben is egyre nagyobb az elvárás a zajterhelés csökkentése iránt. Üdülő-körzetekben egy kerti szerszám esetében ez egy igen lényeges szempont. A zajnak számos forrása lehet [1] egy adott berendezés vonatkozásában, ilyenek pl. a kiegyensúlyozatlan forgórész, szénkefe, burkolat, elektromos zaj, nagy sebességgel mozgó alkatrészről történő örvényleválás, motorhűtését szolgáló ventilátor, csapágyak rezgései, a szerkezet sajátfrekvenciája stb.

A cikk egy elektromos fűszegélynyíró zajkeltésének néhány lehetséges rezgésforrásának meghatározásával foglalkozik. Ilyen nyilvánvaló forrás a nagy sebességgel forgó damilnak, mint feszített húrnak [2] a sajátrezgései, illetve a húron keletkező örvényleválások okozta [3] nagyfrekvenciájú rezgések. A forgórészek a gyakorlatban mindig rendelkeznek kiegyensúlyozatlansággal, ezért a fordulatszámuk meghatározása alapvető fontossággal bír. A fűszegélynyíró igen magas fordulatszámú üzemel, ezért nagy mintavételi frekvenciával rendelkező optikai szenzorral [4] célszerű a mérést elvégezni. A berendezés az alkalmazáshoz közeli körülmények között egy nagy pontosságú érintésmentes lézeres távolságmérővel vizsgálható, majd gyors Fourier transzformációval (FFT) megállapíthatók a jellemző frekvenciák, így a zajforrások dominanciája is meghatározhatóvá válik.

A cikkben elvégzett mérések nem terjednek ki a ventilátor lapát áramlástan vizsgálatára, a süket-szobában történő szabványos zajmérésekre, csupán a rezgéstani mérésekre.

A cikk a következők szerint strukturált: A 2. fejezet foglalkozik a damil, mint feszített húr egyenleteinek előállításával. A 3. fejezet kitér a Strouhal szám alapján becsült, damilnál keletkező örvényleválások frekvenciáira. A 4. fejezet ismerteti a mérések menetét. Az 5. fejezet tartalmazza a számítási- és a mért eredmények bemutatását, illetve az FFT jelfeldolgozás spektrumát. Az utolsó fejezet tárgyalja a kapott mérési eredmények összegző megállapításait.

2. Damil rezgéseinek meghatározása

A fűszegélynyíró vágóképességét egy ω_0 szögsebességgel gyorsan forgó dobból kinyúló két darab $R_2 - R_1$ hosszúságú és d átmérőjű műanyag damil szolgáltatja (lásd: 1. ábra). A centrifugális erő következtében a damilokat az (r, z) hengerkoordináta-rendszerrel együtt forgó feszített húrként lehet modellezni a hajlítási merevség elhanyagolásával.

A feszített húr egyenleteit [2] a Hamilton elv alapján végeselemes módszerrel is tárgyalja:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta U) dt = 0, \quad \delta z(r, t) = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad t = t_1, t_2, \quad (1)$$

ahol T a kinetikai energia és U az alakváltozási energia az alábbi integrálokkal fejezhető ki:

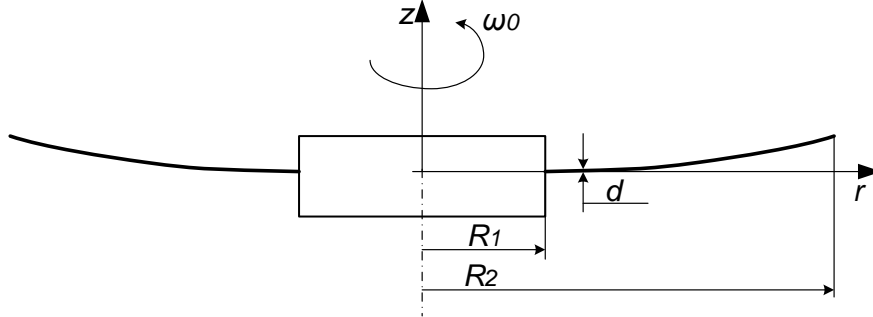
$$T(t) = \frac{1}{2} \int_{R_1}^{R_2} \rho(r) \left[\frac{\partial z(r, t)}{\partial t} \right]^2 dr, \quad (2)$$

$$U(t) = \frac{1}{2} \int_{R_1}^{R_2} N(r) \left[\frac{\partial z(r, t)}{\partial r} \right]^2 dr, \quad (3)$$

ρ a damil sűrűsége, N pedig a damilban ébredő húzóerő, a t_1, t_2 rendre a megfigyelés kezdő- és végső időpontjai. Ez az erő az ív mentén az R_1 sugártól kezdve egy maximális értékről kvadratikusan zérusra csökken az R_2 -ig:

$$N(r) = \int_r^{R_2} \omega_0^2 \rho A r dr = \frac{1}{2} \omega_0^2 \rho A [R_2^2 - r^2], \quad (4)$$

ahol A a damil keresztmetszete.



1. ábra. A kinyúló két damil- és a dob geometriája

Az $R_2 - R_1$ tartományt azonos hosszúságú n_e számú két csomópontú ív szakaszra osztjuk, amelyen a z irányú elmozdulást az alábbi módon közelítjük:

$$z^e(r, t) = \mathbf{H}^e(r) \mathbf{q}^e(t), \quad (5)$$

ahol \mathbf{H}^e a közelítő függvények mátrixa, és a \mathbf{q}^e a csomóponti elmozdulások vektora:

$$\mathbf{H}^e(r) = \left[\left(1 - \frac{r}{L^e}\right) \quad \frac{r}{L^e} \right]; \quad \mathbf{q}^{eT}(t) = [z_1^e(t) \quad z_2^e(t)], \quad (6)$$

L^e egy elem hossza, a z_1^e, z_2^e a két végpontjának függőleges irányú elmozdulása.

Behelyettesítve (5), (6) kifejezéseket (2), (3) összefüggésekbe származtathatjuk az elem \mathbf{M}^e tömegmátrixát és \mathbf{K}^e merevségi mátrixát:

$$\mathbf{M}^e = A\rho L^e \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 3 & 6 \\ 1 & 1 \\ 6 & 3 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}^e = \frac{\bar{N}^e}{L^e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

ahol \bar{N}^e az elemre a csomópontokban és a felezőpontban ébredő erőkből számolt átlagos egyenértékű húzóerő:

$$\bar{N}^e = \frac{1}{L^e} \int_{r_1}^{r_2} N(r) dr = \frac{N_1^e(r_1) + 4N_k^e(r_k) + N_2^e(r_2)}{6}. \quad (8)$$

Mivel a damilban ébredő húzóerő (4) kvadratikus függvény szerint változik, így a (8) integrál Simpson formulával számolva az átlagértékre egzakt eredményt szolgáltat.

Az (1) variációs elvbe visszahelyettesítve az (5) – (7) összefüggéseket, átalakítások után az alábbi autonóm mozgásegyenlet adódik:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{0}, \quad (9)$$

ahol $\mathbf{M} = \sum_1^{n_e} \mathbf{M}^e$, $\mathbf{K} = \sum_1^{n_e} \mathbf{K}^e$ rendre a globális tömeg- és merevségi mátrix a végeselem módszernél alkalmazott elem mátrixok összegzése alapján. A (9) differenciálegyenlet megoldását $\mathbf{q} = \boldsymbol{\phi} \cos(\alpha t)$ alakban keresve egy általánosított sajátérték feladatot kapunk:

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi} = \alpha^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}, \quad (10)$$

ahol α a rendszer saját körfrekvenciája, $\boldsymbol{\phi}$ a rendszer sajátvektora.

3. Frekvenciák becslése Strouhal szám alapján

Strouhal hosszú, több mint egy évszázada hosszú vezetékeken mérte, és meghatározta az örvényleválás okozta „süvítő” zajfrekvenciákat, az alábbi képletet kapta

$$St = \frac{fd}{U_\infty}, \quad (11)$$

ahol St a Strouhal szám, d a vezeték átmérője, U_∞ pedig a szabadáramlás sebessége, f az örvényleválás frekvenciája. A Strouhal szám és Reynolds szám ($250 < R_e < 2 \cdot 10^5$) között az alábbi empirikus képlet írható fel

$$St = 0,198 \left(1 - \frac{19,7}{R_e}\right), \quad (12)$$

ahol R_e a Reynolds számot jelöli:

$$R_e = \frac{U_\infty d}{\nu}, \quad (13)$$

ahol ν jelöli a levegő kinematikai viszkozitását.

Megjegyezzük, hogy az említett (11), illetve (12) összefüggések hosszú vezetékekre kerültek kidolgozásra, a forgó damilra vonatkozóan várhatóan csak tájékoztató jellegű számok határozhatók meg.

4. Rezgésmérés kivitelezése

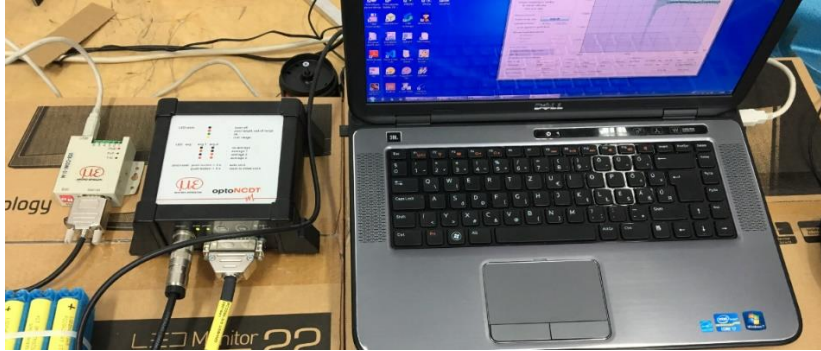
Egy Pepperl Fuchs gyártmányú optikai szenzorral, 1,5 kHz mintavételi frekvencia mellett meghatározásra került a berendezés $n = 11220 \text{ 1/min}$ állandósult fordulatszáma.

A rezgéstani méréshez a szegélynyíró a kézi megfogási pontoknál rögzítettük, a vágóteret lehatároló pajzs külső felületét habszivaccsal lágyan megtámasztottuk (lásd: 2. ábra).



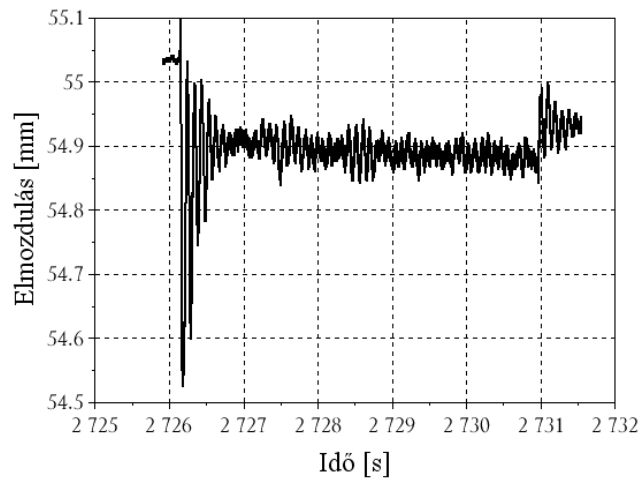
2. ábra. A fűszegélynyíró és a lézeres mérőfej

A lézeres mérőfejet (Micro-epsilon ILD2220-200) a motor oldalsó burkolatára irányítottuk. A fellépő rezgésekből származó burkolaton mért elmozdulásokat a 2. ábrán látható jelfeldolgozó rendszerrel rögzítettük. A méréseknél a mintavételi frekvencia értéke 20 kHz volt.



3. ábra. A lézeres jelfeldolgozó és tápegység, illetve az adattároló számítógép

A bekapcsolást és a leállítást is tartalmazó elmozdulás-idő függvényt a 4. ábra szemlélteti. Az ábrán jól látható az indításkor fellépő transziens rezgés, amely lecsengése után állandósult rezgés jön létre. Kikapcsoláskor ismét fellép egy transziens rezgés. Az állandósult rezgés során az amplitúdó kb. $25\ \mu\text{m}$ nagyságú.



4. ábra. A fűszegélynyíró motor burkolatának oldalán mért elmozdulás-idő függvény

5. A számított- és mért eredmények, kiértékelésük

A 2. fejezetben ismertetett feszített damilra vonatkozó sajátfrekvencia számításoknál az alábbi adatokat használtuk fel: damil átmérője $d = 1,6\text{ mm}$, sűrűsége $\rho = 1,15\text{ kg/m}^3$, elemszám: $n = 20$, az R_1 sugár $37,5\text{ mm}$, az R_2 sugár pedig $142,5\text{ mm}$, a szögsebesség $\omega_0 = 1175\text{ rad/s}$.

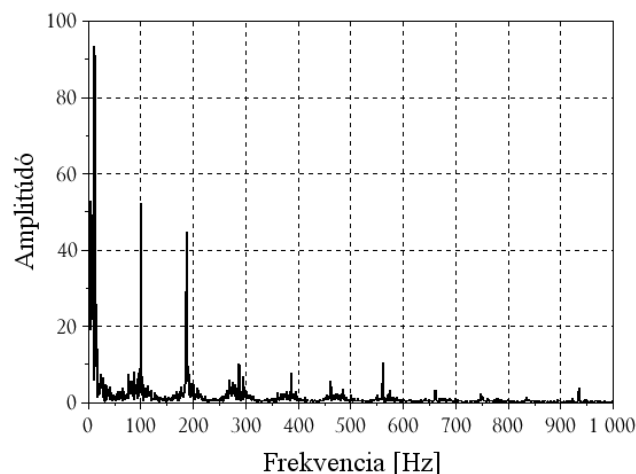
Scilab szoftverben megírt program alapján növekvő sorrendben a jellemző első hat sajátfrekvenciára a következő értékek adódtak: $231,3\text{ Hz}$, $555,4\text{ Hz}$, $881,4\text{ Hz}$, $1217,2\text{ Hz}$, $1567,5\text{ Hz}$, $1935,2\text{ Hz}$.

A 3. fejezetben tárgyalt örvényleválási frekvenciák intervalluma a Reynolds szám, illetve a Strouhal szám alapján, a $v_{min} \cong 44 \text{ m/s}$ minimális és a $v_{max} \cong 167 \text{ m/s}$ maximális sebességek, valamint a levegő kinematikai viszkozitásának $\nu = 0,145 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ismeretében hozzávetőlegesen meghatározhatók: $f_{min} = 5423 \text{ Hz}$, $f_{max} = 20646 \text{ Hz}$. Az intervallum lényegében a hallható hang felső tartományán belül helyezkedik el.

A 4. fejezetben a 4. ábrán, az állandósult állapotra vonatkozó FFT-vel előállított frekvencia spektrumot az 5. ábra mutatja. A 0 – 1000 Hz frekvenciatartományban az alábbi jellemző frekvenciák figyelhetők meg: 11,4 Hz, 100 Hz, 187,1 Hz, 286,4 Hz, 386,5 Hz, 460,5 Hz, 560,6 Hz, 660,7 Hz, 747,8 Hz, 834 Hz, 934,1 Hz.

A spektrum alapján meghatározott jellemző frekvenciákhoz fizikai okok társíthatók. A 11,4 Hz a fűszegélynyíró, habszivaccsal való rugalmas megtámasztásával magyarázható. A 100 Hz az univerzális motorra jellemző, mivel a forgórészben és az állórészben egyszerre fordul meg az áramirány, így az 50 Hz hálózati frekvencia duplájánál nyomatékcúcs lép fel. A 187,1 Hz egybeesik a fordulatszám-mérettel meghatározott értékkel ($11220/60 \text{ Hz}$). A további értékek részben a fordulatszámnak felharmonikusai, illetve a szerkezet sajátfrekvenciái. A spektrumon látható amplitúdó értékek a frekvencia növekedésével fokozatosan csökkennek.

Ezek a jellemző frekvenciák hasonló tartományba esnek, mint a damil legkisebb rezgésére jellemző frekvenciák.



5. ábra. Amplitúdó-spektrum diagram

A legkisebb jellemző frekvencia kivételével a többi rezgés a hallható hang alsó tartományába eső zaj forrásaként jelentkezik.

6. Összefoglalás

A cikk egy fűszegélynyíró berendezés zajforrásainak modellezésével és mérésével foglalkozott. Számítással meghatározásra kerültek a damil sajátfrekvenciái és a leváló örvények frekvenciatartománya. Lézeres rezgésméréssel meghatároztuk az amplitúdó – frekvencia spektrumot és a jellemző frekvenciák alapján beazonosítottuk a lehetséges zajforrásokat. Az elméleti és a mérési eredmények a hallható tartomány alsó és felső határán is szolgáltatottak frekvencia komponenseket.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] Kakuk, J.: Elektromos szegélynyíró gép zajvizsgálata, Multidiszciplináris tudományok 2019, 9(4):383–386. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.37>
- [2] Meirovitch, L.: Fundamentals of Vibrations, McGRAW-HILL, Singapore, 2001., ISBN 0-07-288180-1.
- [3] Sunden, B.: Vortex Shedding, Thermopedia, https://doi.org/10.1615/AtoZ.v.vortex_shedding
- [4] Pepperl+Fuchs: Sensoren für die Fabrikautomation, Pepperl+Fuchs GmbH, Mannheim, 2008.