



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS
TÉZISFÜZETE

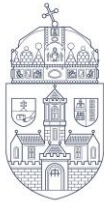
SZUCHY PÉTER

Rezgéscsillapítás párhuzamosan csatolt rugó-tömeg rendszerekkel

Témavezető: Prof. Dr. Cvetityánin Livia
Dr. habil Bíró István

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2023. február 15.



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2023. február 15.

Tartalomjegyzék

1	Summary	4
2	A kutatás előzményei	5
3	Célkitűzések	5
4	Vizsgálati módszerek	6
5	Új tudományos eredmények.....	7
6	Az eredmények hasznosítási lehetősége	12
7	Irodalmi hivatkozások listája/ Irodalomjegyzék	13
8	Publikációk	18
8.1	A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	18
8.2	További tudományos közlemények (opcionális)	19

1 Summary

Recently, mechanical metastructures and metamaterials have been developed for suppression or elimination of vibration. Metamaterials and metastructures are artificially composed systems containing a basic mass in which small masses are added. The added masses have the role of vibration absorbers. Opposed to the conventional materials, the metastructure absorbers are integrated into the basic material. Metastructures are modeled as complex systems of mass-in-mass units, where properties of the added mass-spring unit satisfy the condition for dynamic absorber of the basic mass.

Various types of metastructures have been already developed, and I have also created a new one: the ‘wallpaper’-like metastructure of which the basic structure consists of one main mass and four attached masses in parallel. The vibration of the system is caused by an external excitation force, which acts on the basic structure. The physical and mathematical model of this translational model is developed, and it is solved by rotating vector method.

Based on the principle of the ‘wallpaper’-like metastructure, but keeping the practical needs of measuring in mind, the translational model is changed into the cantilever beam model. The cantilever-mass mechanism for vibration suppression is physically modelled as a system of beams clamped at one end with concentrated masses on the other end, which are attached to the primary structure. Solving the mathematical model, the amplitude-frequency vibration property of the system is obtained and compared with the measured values. The measured parameters are introduced by the application of a newly developed, so-called, ‘elastic support method’.

The vibration suppression of the theoretical translation model is compared with the practical cantilever model. It is concluded that the effect of the suggested mechanism is in good agreement with that of the metastructure for vibration suppression. The resonances of the two models are matched with the results of Inventor Finite Element Analysis, too. Differences in results are negligible.

At the end, an example is introduced by numerical calculations for the amplitude-frequency diagram for various damping values in the translational model. It is found that the amplitudes of vibration have the strong tendency of decrease (in a certain excitation frequency range) as the damping values slightly increase.

2 A kutatás előzményei

A rezgések sok gondot okoznak az emberi szervezetnek és a műszaki alkotásoknak egyaránt. A párhuzamosan csatolt rugó-tömeg rendszerrel történő rezgéscsillapítást először Den Hartog írta le dinamikus rezgéscsillapítóként a XX. század elején, ahol a főtömeg saját frekvenciájának elhangolása volt a cél, az invariáns pontok optimalizálása mellett. A dinamikus rezgéscsillapítással manapság több területen is találkozhatunk: a hidak, toronyházak esetében éppúgy, mint a mosógépeknél vagy az optikai lemez meghajtóknál.

A rezgéscsökkentési kutatások közül kiemelkedett az elmúlt húsz évben a metaanyagok kutatása, ahol az anyag elsődleges tulajdonságait annak belső szerkezete szolgáltatja. A metaanyagok közül az akusztikus metaanyagok alkalmasak az általam megcélzott 1000 Hz alatti frekvencia tartományban létrejövő rezgések mérséklésére, célszerűen megtervezett kialakításuknak köszönhetően. Ezek közül is a „tömeg-a-tömegben” rendszer került előtérbe, ahol az általam kitalált „Tapéta”-jellegű akusztikus metaanyag rezgéscsillapító tulajdonságainak vizsgálata folyik. Ez a metaanyag struktúra a fononikus kristályokra jellemző leginkább, amelyek szóró és/vagy rezonáló alegységeket tartalmaznak szabályos elrendezésben a hordozó anyagban. Ezek az alegységek tipikusan eltérő akusztikus impedanciával rendelkeznek a hordozó anyaghoz képest. Legfőbb jellemzőjük azok a frekvenciasáv-rések (band-gap regions), ahol a rezgések terjedése gátolt a szóró és rezonáló alegységek kombinációjának köszönhetően. Számos 2D és 3D megoldás született már, ezeket legutóbb Lucklum és Vellekop gyűjtötte össze és rendszerezte.

3 Célkitűzések

„Tapéta”-jellegű akusztikus metaanyag leírása translációs és hajlított tartós n -szabadságfokú, gerjesztett, csillapított vibrációs mechanikai és matematikai modellekkel, ahol a fő tömeghez $n-1$ darab párhuzamosan csatolt tömeg tartozik. A modellek vizsgálatának célja olyan, a gyakorlatban is alkalmazható, tömeg-a-tömegben elrendezésű akusztikus metaanyag fizikai tulajdonságait leíró paramétereinek meghatározása, amellyel alkalmassá válik a fő tömeget érő gerjesztés hatásának jelentős csökkentésére, egyes speciális esetekben megszüntetésére. A modell lehetővé teszi a metaanyag paramétereinek célszerű beállításával a rezgéscsökkentés hatékony megvalósítását a kívánt gerjesztési frekvencia tartományban.

A téma kutatásának hipotézisei:

- A rezgés amplitúdójának csökkenése érhető el célszerűen megtervezett, párhuzamosan csatolt tömegekkel („Tapéta”-jellegű akusztikus metastruktúra) a csatolmányok saját frekvenciái körüli frekvencia-tartományban.
- Amennyiben a főtömeget érő külső gerjesztés frekvenciája valamelyik párhuzamosan csatolt tömeg saját frekvenciájának közelébe ér, a csatolt tömeg (rezonanciája folytán) átveszi a főtömegetől a mozgási energiát és lelassítja azt.
- A többi párhuzamosan csatolt tömeg nem befolyásolja ezt a jelenséget (amennyiben kellő távolságot biztosítunk a csatolt tömegek saját frekvenciái között), így adott gerjesztési frekvencián csak egy csatolt tömeg fog rezonálni.
- A csatolt tömegek rugóinak nem-lineáris rugókarakterisztikái esetén a lineáris rugókarakterisztikákhoz képest szélesebb megállító sáv adódik.

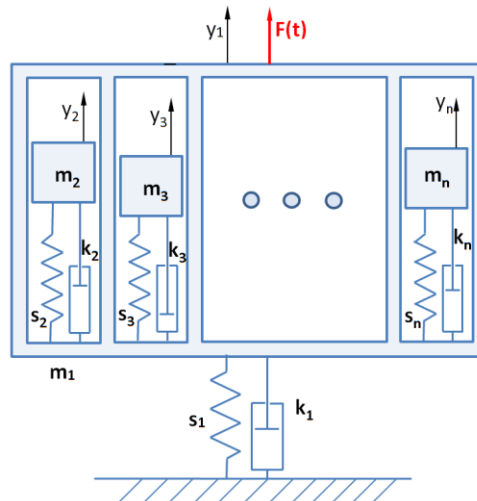
4 Vizsgálati módszerek

- Irodalomkutatás
- Elméleti módszerek:
 - Mechanikai modellek felállítása és matematikai leírása.
 - Főtömeg rezgési amplitúdójának számítása a gerjesztési frekvencia függvényében analitikus és numerikus megoldással, valamint végelem analízissel.
- Gyakorlati módszerek:
 - Hajlított tartós modell kidolgozása a mérés gyakorlati megvalósíthatósága érdekében.
 - Előzetes számítások alapján 3D szilárdtest modell készítése, majd az abból nyert fizikai adatok (tömeg, méret, stb.) alapján a rendszer előállítása, a sajátfrekvenciák kimérése.

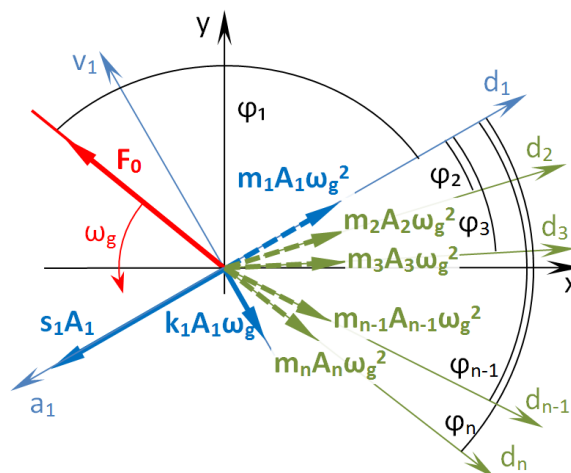
5 Új tudományos eredmények

Az új tudományos eredményeim az alábbi négy tézisben foglaltam össze:

- I. tézis** Kiterjesztettem a forgó vektorokkal leírt rezgések körét az n szabadságfokú, gerjesztett, csillapított, translációs mozgású, lineáris karakterisztikájú rezgő rendszerre, ahol a gerjesztett főtömeghez $n-1$ darab párhuzamosan csatolt gerjesztetlen tömeg kapcsolódik.



1. ábra Az n szabadságfokú, gerjesztett, csillapított, translációs mozgású, lineáris karakterisztikájú rezgő rendszer modellje



2. ábra A főtömegre (m_1) ható erők D'Alembert szerint, $n-1$ csatolt tömeg esetén
Az n -számú, másodrendű differenciál-egyenletből álló egyenletrendszert analitikusan megoldottam a főtömeg amplitúdóját kifejezve, a csatolt tömegeknek a főtömeg elmozdulásához képest létrejövő fáziskéséseivel és egy

újonnan bevezetett amplitúdó aránnyal (G_{il}), a csillapítások és a gerjesztési frekvencia függvényében:

$$A_1 = \frac{F_0}{\sqrt{(s_1 - m_1 \omega_g^2 - \sum_{i=2}^n m_i G_{i1} \omega_g^2 \cos \varphi_i)^2 + (k_1 \omega_g + \sum_{i=2}^n m_i G_{i1} \omega_g^2 \sin \varphi_i)^2}}$$

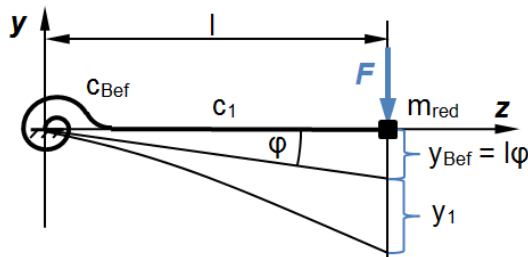
ahol:

$$G_{i1} = \sqrt{\frac{(2D_i \omega_g \omega_i^{-1})^2 + 1}{(1 - \omega_g^2 \omega_i^{-2})^2 + (2D_i \omega_g \omega_i^{-1})^2}}, \quad \varphi_i = \arctg \frac{\omega_g \omega_i^{-1}}{(2D_i)^{-1} (\omega_g \omega_i^{-1})^{-2} - (2D_i)^{-1} + 2D_i},$$

$$D_i = \frac{k_i}{2m_i \omega_i}, \quad \omega_i = \sqrt{\frac{s_i}{m_i}}$$

[P1 - P9. publikációk]

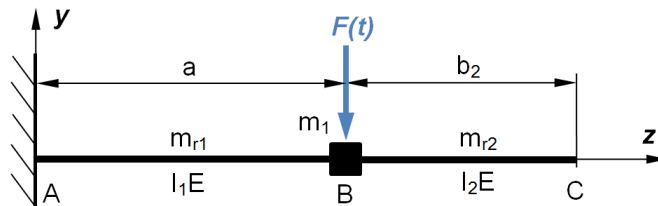
II. tézis Új eljárást dolgoztam ki a rugalmas befogás rugómerevségének meghatározására hajlított tartós modell esetében, ami az egy szabadságfokú rendszer mérési eredményeiből indul ki.



3. ábra A rugalmas befogás elméleti modellje

$$c_{Bef} = \frac{1}{(2\pi f_{mért} l)^2 m_{red}} - \frac{l}{3IE}$$

ahol a rugó redukált tömegének számítása során a rúd (mint rugó) tömegét az m_1 tömeg pozíciójába redukáltam.



4. ábra A rugó tömegének redukálása az m_1 tömeg pozíciójába

$$m_{red} = \frac{33}{140} m_{r1} + m_{r2} \frac{3(a + b_2)^2 + a^2}{4a^2}$$

Az így meghatározott befogási rugómerevséggel az n szabadságfokú hajlított tartós modell ($i=2..n$ párhuzamosan csatolt tömeggel) rugóállandó mátrixának (C) elemeit a következőképpen írtam fel:

$$c_{11} = c_{Bef} a^2 + \frac{a^3}{3 I_1 E}$$

$$c_{1i} = c_{i1} = c_{Bef}(a^2 + ab_i) + \frac{a^2(2a+3b_i)}{6 I_1 E}, \quad (i = 2 \dots n)$$

$$c_{ii} = c_{Bef}(a + b_i)^2 + \frac{a(a^2+3ab_i+3b_i^2)}{3 I_1 E} + \frac{b_i^3}{3 I_1 E}, \quad (i = 2 \dots n)$$

$$c_{ij} = c_{ji} = c_{Bef}[a^2 + a(b_i + b_j) + b_i b_j] + \frac{a[2a^2+3a(b_i+b_j)+6b_i b_j]}{6 I_1 E}, \quad (i, j = 2 \dots n, i \neq j)$$

[P1., P3., P8. publikáció]

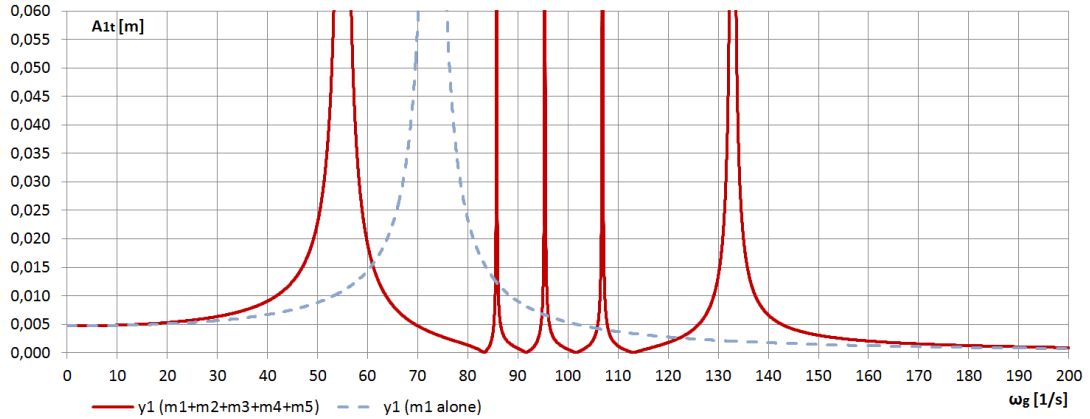
III. tézis **Eljárást dolgoztam ki a transzlációs és a hajlított tartós modellek mozgásjellemzőinek összehasonlítására, a rezonancia frekvenciák és a főtömeget megállító frekvenciák összevetésével.**

Az eljárás lépései a következők:

1. Első lépésben megalkottam az AutoCAD Inventor segítségével az előzetes számításoknak fizikailag is megfelelő 3D szilárdtest modellt.
2. A 3D modellből meghatároztam az m_i ($i=1..5$) koncentrált tömegeket $\rho=7850$ kg/m³ sűrűséggel. A rugók tömegét a többi tömeghez képest elhanyagolható szinten [5], a koncentrált tömegekhez viszonyítva 10%-os érték alatt tartottam a 3D modell megalkotásánál. Erre azért volt szükség, mert a hajlított tartós modellel szemben a transzlációs modellnél nincs lehetőség a rugók tömegének beszámítására.
3. A 3D modell geometriai adataiból kiszámítottam a hajlított tartós modell hajlítási ellenállási értékeit, $E=210$ GPa rugalmassági modulusszal.
4. A vonatkozó képleteknek megfelelően kiszámoltam a hajlított tartós modell rugóállandó mátrixának elemeit, majd azok alapján a transzlációs modell rugómerevségeit.
5. A befogási rugómerevséget és a csillapításokat szintén elhanyagoltam a két modell azonos szintű beállítása céljából. (Befogási rugómerevség a transzlációs

modellben nincs, csillapítás a hajlított tartós modellben került korábban elhanyagolásra.)

6. A translációs (t indexű) modell A_{1t} amplitúdója a gerjesztési körfrekvencia függvényében a korábban tárgyalt módon került meghatározásra. Az eredményeket egy adott, de nem részletezett példán az 5. ábra mutatja be. Piros folytonos vonallal látható a csatolt tömegekkel ellátott főtömeg amplitúdója, szaggatott kék vonal jelöli a csatolt tömegek nélküli amplitúdót.

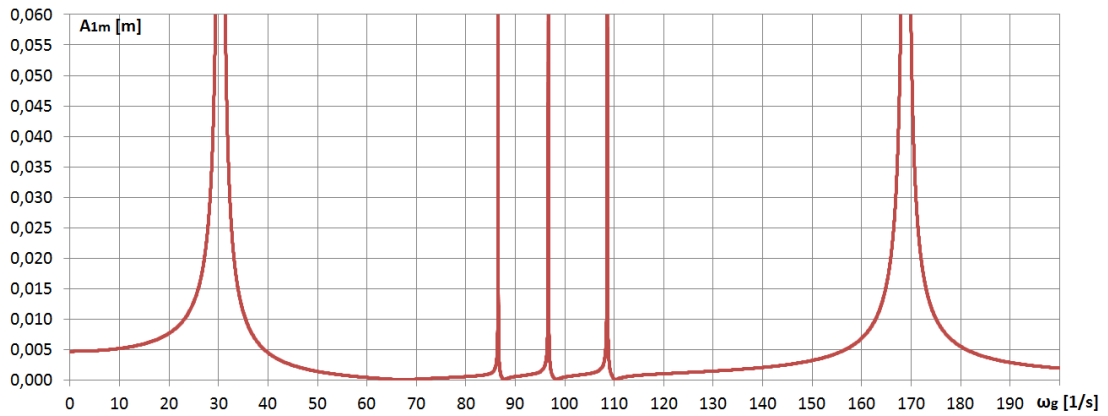


5. ábra 5-DoF (folytonos vonal) és 1-DoF (csatolt tömegek nélküli) (szaggatott vonal) translációs modell amplitúdói a gerjesztési frekvencia függvényében

7. A Cramer szabály és a vonatkozó egyenletek felhasználásával kiszámítottam a rugóállandó mátrix értékeit, majd a hajlított tartós (m indexű) modell főtömegének A_{1m} amplitúdóját az adott ω_g gerjesztési körfrekvencián a következők szerint:

$$A_{1m} = \frac{\begin{vmatrix} F_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22}^{-1} - m_2 \omega_g^2 & C_{23}^{-1} & C_{24}^{-1} & C_{25}^{-1} \\ 0 & C_{32}^{-1} & C_{33}^{-1} - m_3 \omega_g^2 & C_{34}^{-1} & C_{35}^{-1} \\ 0 & C_{42}^{-1} & C_{43}^{-1} & C_{44}^{-1} - m_4 \omega_g^2 & C_{45}^{-1} \\ 0 & C_{52}^{-1} & C_{53}^{-1} & C_{54}^{-1} & C_{55}^{-1} - m_5 \omega_g^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} C_{11}^{-1} - m_1 \omega_g^2 & C_{12}^{-1} & C_{13}^{-1} & C_{14}^{-1} & C_{15}^{-1} \\ C_{21}^{-1} & C_{22}^{-1} - m_2 \omega_g^2 & C_{23}^{-1} & C_{24}^{-1} & C_{25}^{-1} \\ C_{31}^{-1} & C_{32}^{-1} & C_{33}^{-1} - m_3 \omega_g^2 & C_{34}^{-1} & C_{35}^{-1} \\ C_{41}^{-1} & C_{42}^{-1} & C_{43}^{-1} & C_{44}^{-1} - m_4 \omega_g^2 & C_{45}^{-1} \\ C_{51}^{-1} & C_{52}^{-1} & C_{53}^{-1} & C_{54}^{-1} & C_{55}^{-1} - m_5 \omega_g^2 \end{vmatrix}}$$

A 6. ábrán látható a hajlított tartós modell maximális kitérése a gerjesztési körfrekvencia függvényében a translációs rezgési példa adataival.



6. ábra 5-DoF hajlított tartós modell amplitúdói a gerjesztés függvényében

8. A kapott analitikus eredményeket numerikus számításokkal igazoltam (4. sz. függelék). A numerikus számításokat az Excell segítségével végeztem el a következők szerint:

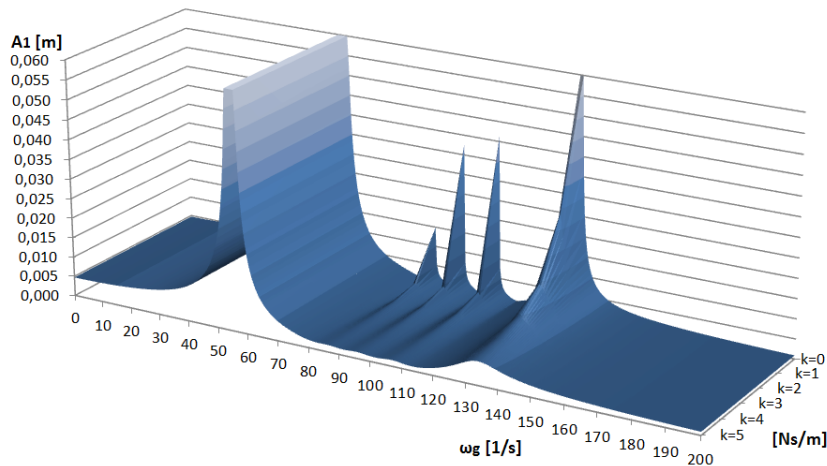
- A számításokat $\Delta t=0,0001$ s-os időközökkel végeztem 0-10 s időtartamban.
- A kezdeti tranziens jelenségek eliminálására $k_1=80\text{Ns/m}$ értéket kellett beállítanom, hogy a 3. másodperc végére lecsengjenek. Ez a görbék bizonyos fokú torzításához vezetett, de az igazolást nem veszélyeztette.
- A maximális értékeket a 4-10 s időtartamból szűrtem ki.

Az összehasonlítás alapján megállapítottam, hogy a hajlított tartós modellel vizsgálható a translációs modell viselkedése gerjesztett rezgések esetén, az eltérések figyelembe vétele mellett.

[P1. publikáció]

IV. tézis **Kimutattam, hogy több párhuzamosan csatolt tömeg esetében a csatolások kismértékű csillapítása is jelentősen csökkenti a közbülső rezonancia frekvencián jelentkező főtömeg amplitúdókat, így csak a két szélső (legkisebb és legnagyobb) rezonancia frekvenciájú hely marad kimérhető értékű.**

A 7. ábra ábrázolja egy adott példán keresztül a főtömeg amplitúdót a gerjesztési frekvencia és a csillapítási tényező függvényében. A kritikus csillapítás értékei



7. ábra Főtömeg amplitúdó a gerjesztési frekvencia és a csillapítási tényező függvényében translációs modellnél.

[P1. publikáció]

6 Az eredmények hasznosítási lehetősége

Az n szabadságfokú, gerjesztett, csillapított, translációs, lineáris karakterisztikájú rezgő rendszer (1 gerjesztett főtömeg, $n-1$ gerjesztetlen csatolt tömeg) forgóvektorral történő leírásával szemléletesebbé vált a különböző, anyag-az-anyagban rendszerű metaanyagok viselkedésének vizsgálata.

A rugalmas befogás elméletének bevezetése hozzájárul a befogott, hajlított tartókon mért saját frekvencia eredmények pontosabb elméleti megközelítéséhez.

A két modell (befogott tartós és translációs) összehasonlításával, a különbségek feltérképezésével elérhetővé válik az egyszerűbben megvalósítható és állítható befogott tartós modellen mért eredményekből a translációs modell várható viselkedésnek becslése.

A IV. tézis felhívja a figyelmet, hogy a csatoló anyag csillapítási tényezőjének nulla értékről való elmozdulása nagymértékben befolyásolja dinamikus csillapítási lehetőségeket.

Összességében elmondható, hogy az eredmények hozzájárulnak a tömeg-a-tömegben rendszerű metaanyagok vizsgálatának elméleti oldalról történő pontosabb megközelítéshez, vagy akár a párhuzamosan csatolt tömeggel végzett dinamikus rezgéscsillapítás tervezési rendszerének helyesebb kialakításához.

7 Irodalmi hivatkozások listája/ Irodalomjegyzék

- [1] EU-OSHA – European Agency for Safety and Health at Work, Report - Workplace exposure to vibration in Europe: an expert review, 008.
https://osha.europa.eu/en/publications/reports/8108322_vibration_exposure/view
- [2] Európai Bizottság, Nem kötelező útmutató a munkavállalók fizikai tényezők (vibráció) hatásából keletkező kockázatoknak való expozíciójára vonatkozó egészségügyi és biztonsági minimumkövetelményekről szóló 2002/44/EK irányelv végrehajtásának helyes gyakorlatához, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2008. Letölthető: <https://publications.europa.eu/hu/publication-detail/-/publication/3f9392ff-8975-4139-9ea2-5b168a334664>
- [3] Kolonics, G: Zaj okozta halláskárosodás kérdései a honvédségben, Hadmérnök, IV. évfolyam 3. szám, 2009. szeptember.
- [4] Bihari, Z; Tóbis, Zs; Sarka, F: Akusztikai és rezgéstani minősítés, Miskolci Egyetemi jegyzet, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2010
- [5] Hegedűs, A: Fejezetek a kinetikából REZGÉSTAN, Szent István Egyetemi Kiadó, Gödöllő, 2015 ISBN:978-963-269-468-9
- [6] Vivien Denis: Vibration damping in beams using the acoustic black hole e_ect. Vibrations [physics.class-ph]. Universit_e du Maine, 2014. English.Ludvig
- [7] Ludvig, Gy: Gépek dinamikája, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983 ISBN: 963 10 4802 0
- [8] Chang, C. C., QU, W. L.: Unified dynamic absorber design formulas for wind-induced vibration cotrol of tall buildings, Struct. Design Tall Build. 7, 147-166 (1988)
- [9] Duncan, G.S et al: An investigation of the dynamic absorber effect in high-speed machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 497-507
- [10] Campos, R. O., Nicoletti, R.: Vibration reduction in vertical washing machine using a rotating dynamic absorber, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, (2015) 37:339-348, DOI 10.1007/s40430-014-0151-1]
- [11] Komatsuzaki, T. et al: Broadband vibration control of a structure by using a magnetorheological elastomer-based tuned dynamic absorber, Mechatronics 40 (2016) 128-136
- [12] Hoang, N. et al: A dynamic absorber with a soft magnetorheological elastomer for powertrain vibration suppression, Smart Materials and Structures 18 (2009) 074009 (10pp) doi:10.1088/0964-1726/18/7/074009
- [13] Jia J. (2017) Dynamic Absorber. In: Modern Earthquake Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31854-2_24
- [14] Tian Wang et al: A Novel Dynamic Absorber with Variable Frequency and Damping, Shock and Vibration, Volume 2021, Article ID 8833089, 10 pages, <https://doi.org/10.1155/2021/8833089>

- [15] Gil Ho Yoon et al.: Development and optimization of a resonance-based mechanical dynamic absorber structure for multiple frequencies, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2021, Vol. 40 (2) 880-897, DOI: 10.1177/1461348419855533
- [16] Chi-Shen Chang, Tzong-Shi Liu: Design of Adaptive Dynamic Absorber to Reduce Optical Disk Drive Vibration at Multiple Rotating Speeds, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 2B, 2006, pp. 1120–1123
- [17] Krzysztof Kecik: Assessment of energy harvesting and vibration mitigation of a pendulum dynamic absorber, *Mechanical Systems and Signal Processing* 106 (2018) 198–209 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.12.028>
- [18] Sushil S Patil: Grass trimmer hand-arm vibration reduction using multi-axial vibration absorber, *Noise & Vibration Worldwide* 2019, Vol. 50(8) 245–253 DOI: 10.1177/0957456519869926
- [19] Pai P.F.: Metamaterial-based broadband elastic wave undamped vibration absorber. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 21(5) (2010) 517-528
- [20] Cveticanin L., Mester Gy.: Theory of acoustic metamaterials: an overview. *Acta Polytechnica Hungarica*. 13(7) (2016) 43-62
- [21] Huang, H.H., Sun, C.T., Huang, G.I.: On the negative effective mass density in acoustic metamaterials, *International Journal of Engineering Science*, 47, 2009, 610-617
- [22] Askari et al.: Additive manufacturing of metamaterials: A review, *Additive Manufacturing* 36 (2020) 101562 <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101562>
- [23] Veselago V.G.: The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov. Phys. Usp* 10 (1968) 509-514
- [24] Huang H.H., Sun C.T., Huang G.I.: On the negative effective mass density in acoustic metamaterials. *International Journal of Engineering Science* 47 (2009) 610-617
- [25] S. Yang, J.H. Page, Z. Liu, M.L. Cowan, C.T. Chan, P. Sheng, Focusing of sound in a 3D phononic crystal, *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004), 024301, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.024301>
- [26] X. Zhang, Z. Liu: Negative refraction of acoustic waves in two-dimensional phononic crystals, *Appl. Phys. Lett.* 85 (2004) 341–343, <https://doi.org/10.1063/1.1772854>
- [27] A. Sukhovich, L. Jing, J.H. Page: Negative refraction and focusing of ultrasound in two-dimensional phononic crystals, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 77 (2008), 014301, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.014301>
- [28] J.H. Page: Focusing of ultrasonic waves by negative refraction in phononic crystals, *AIP Adv.* 6 (2016), 121606, <https://doi.org/10.1063/1.4972204>
- [29] J. Zhu, J. Christensen, J. Jung, L. Martin-Moreno, X. Yin, L. Fok, X. Zhang, F. J. Garcia-Vidal: A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging, *Nat. Phys.* 7 (2011) 52–55, <https://doi.org/10.1038/nphys1804>

- [30] H. Su, X. Zhou, X. Xu, G. Hu: Experimental study on acoustic subwavelength imaging of holey-structured metamaterials by resonant tunneling, *J. Acoust. Soc. Am.* 135 (2014) 1686–1691, <https://doi.org/10.1121/1.4868395>
- [31] Z. Liang, J. Li: Extreme acoustic metamaterial by coiling up space, *Phys. Rev. Lett.* 108 (2012) 1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.114301>.
- [32] Z. Liang, T. Feng, S. Lok, F. Liu, K.B. Ng, C.H. Chan, J. Wang, S. Han, S. Lee, J. Li: Space-coiling metamaterials with double negativity and conical dispersion, *Sci. Rep.* 3 (2013) 1614, <https://doi.org/10.1038/srep01614>
- [33] Y. Xie, A. Konneker, B.I. Popa, S.A. Cummer: Tapered labyrinthine acoustic metamaterials for broadband impedance matching, *Appl. Phys. Lett.* 103 (2013), 201906, <https://doi.org/10.1063/1.4831770>
- [33] M. Miniaci, A. Marzani, N. Testoni, L. De Marchi: Complete band gaps in a polyvinyl chloride (PVC) phononic plate with cross-like holes: numerical design and experimental verification, *Ultrasonics* 56 (2015) 251–259, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.07.016>
- [34] O. Yuksel, C. Yilmaz: Shape optimization of phononic band gap structures incorporating inertial amplification mechanisms, *J. Sound Vib.* 355 (2015) 232–245, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.06.016>
- [35] F. Lucklum, M. Vellekoop: Design and Fabrication Challenges for Millimeter-Scale Three-Dimensional Phononic Crystals, *Crystals* 7 (2017) 348, <https://doi.org/10.3390/cryst7110348>
- [36] K.H. Matlack, A. Bauhofer, S. Krödel, A. Palermo, C. Daraio: Composite 3D-printed metastructures for low-frequency and broadband vibration absorption, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113 (2016) 8386–8390, <https://doi.org/10.1073/pnas.1600171113>
- [37] Pennec et al.: Two-dimensional phononic crystals: Examples and applications, *Surface Science Reports* 65 (2010) 229–291 doi:10.1016/j.surfrep.2010.08.002
- [38] L. D’Alessandro, E. Belloni, R. Ardito, A. Corigliano, F. Braghin: Modeling and experimental verification of an ultra-wide bandgap in 3D phononic crystal, *Appl. Phys. Lett.* 109 (2016), 221907, <https://doi.org/10.1063/1.4971290>
- [39] X.H. Zhang, Z.G. Qu, X.C. He, D.L. Lu: Experimental study on the sound absorption characteristics of continuously graded phononic crystals, *AIP Adv.* 6 (2016), 105205, <https://doi.org/10.1063/1.4965923>
- [40] F. Lucklum, M.J. Vellekoop: Rapid prototyping of 3D phononic crystals using high-resolution stereolithography fabrication, *Procedia Eng.* 120 (2015) 1095–1098, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.783>
- [41] K. Cai, B. Román-Manso, J.E. Smay, J. Zhou, M.I. Osendi, M. Belmonte, P. Miranzo: Geometrically complex silicon carbide structures fabricated by robocasting, *J. Am. Ceram. Soc.* 95 (2012) 2660–2666, <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2012.05276.x>.
- [42] A. Kruisová, H. Seiner, P. Sedláček, M. Landa, B. Román-Manso, P. Miranzo, M. Belmonte: Acoustic metamaterial behavior of three-dimensional periodic architectures

- assembled by robocasting, *Appl. Phys. Lett.* 105 (2014), 211904, <https://doi.org/10.1063/1.4902810>
- [43] A. Elayouch, M. Addouche, A. Khelif: Extensive tailorability of sound absorption using acoustic metamaterials, *J. Appl. Phys.* 124 (2018), 155103, <https://doi.org/10.1063/1.5035129>
- [44] S. Laureti, D.A. Hutchins, L.A.J. Davis, S.J. Leigh, M. Ricci: High-resolution acoustic imaging at low frequencies using 3D-printed metamaterials, *AIP Adv.* 6 (2016), 121701, <https://doi.org/10.1063/1.4968606>
- [45] Aichao Yang et al.: Enhanced Acoustic Energy Harvesting Using Coupled Resonance Structure of Sonic Crystal and Helmholtz Resonator, *Applied Physics Express* 6 (2013) 127101 3) 127101 <http://dx.doi.org/10.7567/APEX.6.127101>
- [46] Z. Liang, T. Feng, S. Lok, F. Liu, K.B. Ng, C.H. Chan, J. Wang, S. Han, S. Lee, J. Li: Space-coiling metamaterials with double negativity and conical dispersion, *Sci. Rep.* 3 (2013) 1614, <https://doi.org/10.1038/srep01614>
- [47] R. Ghaffarivardavagh, J. Nikolajczyk, R. Glynn Holt, S. Anderson, X. Zhang: Horn-like space-coiling metamaterials toward simultaneous phase and amplitude modulation, *Nat. Commun.* 9 (2018) 1349, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03839-z>
- [48] M. Moleron, M. Serra-Garcia, C. Daraio: Acoustic Fresnel lenses with extraordinary transmission, *Appl. Phys. Lett.* 105 (2014), 114109, <https://doi.org/10.1063/1.4896276>
- [49] G. Memoli, M. Caleap, M. Asakawa, D.R. Sahoo, B.W. Drinkwater, S. Subramanian: Metamaterial bricks and quantization of meta-surfaces, *Nat. Commun.* 8 (2017), 14608, <https://doi.org/10.1038/ncomms14608>
- [50] X.F. Fu, G.Y. Li, M.H. Lu, G. Lu, X. Huang: A 3D space coiling metamaterial with isotropic negative acoustic properties, *Appl. Phys. Lett.* 111 (2017), 251904, <https://doi.org/10.1063/1.5005553>
- [51] Y. Xie, Y. Fu, Z. Jia, J. Li, C. Shen, Y. Xu, H. Chen, S.A. Cummer: Acoustic imaging with metamaterial luneburg lenses, *Sci. Rep.* 8 (2018), 16188, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34581-7>
- [52] S.K. Maurya, A. Pandey, S. Shukla, S. Saxena: Predicting double negativity using transmitted phase in space coiling metamaterials, *R. Soc. Open Sci.* 5 (2018), 33683, <https://doi.org/10.1098/rsos.171042>
- [53] Y. Xie, B.I. Popa, L. Zigoneanu, S.A. Cummer: Measurement of a broadband negative index with space-coiling acoustic metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013), 175501, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.175501>
- [54] A.A. Zadpoor, *Mechanical meta-materials*, *Mater. Horizons.* 3 (2016) 371–381, <https://doi.org/10.1039/c6mh00065g>
- [55] H.H. Hilton, D.H. Lee, A.R.A. El Fouly, Generalized viscoelastic designer functionally graded auxetic materials engineered/tailored for specific task performances, *Mech. Time-Dependent Mater.* 12 (2008) 151–178, <https://doi.org/10.1007/s11043-008-9054-9>

- [56] J.H. Lee, J.P. Singer, E.L. Thomas: Micro-/nanostructured mechanical metamaterials, *Adv. Mater.* 24 (2012) 4782–4810, <https://doi.org/10.1002/adma.201201644>
- [57] Xianglong Yu et al.: Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, *Progress in Materials Science* 94 (2018) 114–173 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.003>
- [58] K. Bertoldi, V. Vitelli, J. Christensen, M. Van Hecke, Flexible mechanical metamaterials, *Nat. Rev. Mater.* (2017), <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.66>
- [59] E. Andreassen, B.S. Lazarov, O. Sigmund, Design of manufacturable 3D extremal elastic microstructure, *Mech. Mater.* 69 (2014) 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.09.018>
- [60] T. Bückmann, R. Schittny, M. Thiel, M. Kadic, G.W. Milton, M. Wegener, On three-dimensional dilational elastic metamaterials, *New J. Phys.* 16 (2014), 033032, <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/3/033032>
- [61] R. Schittny, T. Bückmann, M. Kadic, M. Wegener, Elastic measurements on macroscopic three-dimensional pentamode metamaterials, *Appl. Phys. Lett.* 103 (2013), 231905, <https://doi.org/10.1063/1.4838663>
- [62] R. Critchley, I. Corni, J.A. Wharton, F.C. Walsh, R.J.K. Wood, K.R. Stokes, The preparation of auxetic foams by three-dimensional printing and their characteristics, *Adv. Eng. Mater.* 15 (2013) 980–985, <https://doi.org/10.1002/adem.201300030>
- [63] T. Bückmann, M. Thiel, M. Kadic, R. Schittny, M. Wegener, An elasto-mechanical unfeeleability cloak made of pentamode metamaterials, *Nat. Commun.* 5 (2014) 4130, <https://doi.org/10.1038/ncomms5130>
- [64] T. Frenzel, M. Kadic, M. Wegener, Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist, *Science* 358 (80-) (2017) 1072–1074, <https://doi.org/10.1126/science.aao4640>
- [65] R. Hedayati, A.M. Leeflang, A.A. Zadpoor, Additively manufactured metallic pentamode meta-materials, *Appl. Phys. Lett.* 110 (2017), 091905, <https://doi.org/10.1063/1.4977561>
- [66] WenwangWu et al.: Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review, *Materials and Design* 180 (2019) 107950 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950>
- [67] Peng, H., Pai, P.F.: Acoustic metamaterial plates for elastic wave absorption and structural suppression, *International Journal of Mechanical Sciences*, 89, 2014, 350-361.
- [68] Cveticanin, L., Zukovic, M., Mester, Gy., Biro, I., Sarosi, J.: Oscillators with symmetric and asymmetric quadratic nonlinearity, *Acta Mechanica*, 227(6), 2016, 1727-1742.
- [69] Cveticanin, L., Mester, Gy: Theory of acoustic metamaterials and metamaterial beams: An overview, *Acta Polytechnica Hungarica*, 13(7), 2016, 43-62.
- [70] Cveticanin L., Zukovic M.: Negative effective mass in acoustic metamaterial with nonlinear mass-in-mass subsystems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 51 (2017) 89-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.03.017>

- [71] Zhu R., Liu X.N., Hu G.K., Sun C.T., Huang G.L.: A chiral elastic metamaterial beam for broadband vibration suppression. *Journal of Sound and Vibration* 333 (2014) 2759-2773.
- [72] Bíró, I.: *Mechanikai lengések*, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Szeged, 2014. 122 p. ISBN:978-963-306-288-3
- [73] Nayfeh, A. H., Mook, D. T.: *Nonlinear oscillations*, JOHN WILEY & SONS, New York, 1979. ISBN 0-471-03555-6
- [74] Vakakis, A.F., Blanchard, A.: Exact steady states of the periodically forced and damped Duffing oscillator, *Journal of Sound and Vibration*, 413 (2018) 57-65.
- [75] Zhu R., Liu X.N., Hu G.K., Sun C.T., Huang G.L.: A chiral elastic metamaterial beam for broadband vibration suppression. *Journal of Sound and Vibration* 333 (2014) 2759-2773.

8 Publikációk

8.1 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- P1. Szuchy, P; Cveticanin, L; Bíró, I: Multi Cantilever-Mass Mechanism for Vibration Suppression, *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA* , Vol. 19, No. 7, pp. 197-212. 16 p. (2022) (megjelenés alatt, de már hivatkozható)
- P2. Szuchy, Péter: Research of Acoustic Metamaterials at the University of Szeged, Faculty of Engineering, In: Marinca, Vasile; Herisanu, Nicolae (szerk.) *Acoustics and Vibration of Mechanical Structures—AVMS 2019 Timisoara, Románia: Springer International Publishing* (2020) pp. 485-498. Paper: Chapter 49, 14 p. DOI ISBN: 9783030541354; DOI: 10.1007/978-3-030-54136-1_49
- P3. Szuchy, Péter; Bíró, István: Damped 2-DOF subsystems of acoustic metamaterials, *IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING* 393 Paper: 012038 , 8 p. (2018) DOI: 10.1088/1757-899X/393/1/012038
- P4. Cveticanin, L.; Suchy, P.; Biro, I.; Zukovic, M.: Rotating vector solving method applied for nonlinear oscillator, *EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL-SPECIAL TOPICS* & p. & (2021) DOI: 10.1140/epjs/s11734-021-00233-7
- P5. Szuchy, Péter: Akusztikus metaanyag kutatás a Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Karán, *BÁNKI KÖZLEMÉNYEK* Vol 2 No 2 pp. 5-9. , 5 p. (2019)
- P6. Szuchy, Péter: 5-DEGREE-OF-FREEDOM SUBSYSTEMS IN ACOUSTIC METAMATERIALS, In: Boris, AGARSKI; Milana, ILIĆ MIĆUNOVIĆ; Željko, SANTOŠI (szerk.) *ETIKUM 2018 Novi Sad, Szerbia: University of Novi Sad* (2018) pp. 53-56. , 4 p.
- P7. Cveticanin, Livia; Szuchy, Péter: Akusztikus metaanyagok és felhasználásuk a gépészmérnöki gyakorlatban, In: n a (szerk.) *III. GÉPÉSZETI SZAKMAKULTÚRA KONFERENCIA : A gépészeti fejlesztés az ötlettől a hasznosulásig, Budapest, Magyarország: Gépipari Tudományos Egyesület (GTE)* (2018) p. 2a3 autopszia

- P8. István, Bíró; Livija, Cveticanin; Péter, Szuchy: Numerical method to determine the elastic curve of simply supported beams of variable cross-section, STRUCTURAL ENGINEERING AND MECHANICS 68 : 6 pp. 713-720. , 8 p. (2018) DOI: 10.12989/sem.2018.68.6.713
- P9. Szuchy, P.: Overview of Two Degree-of-Freedom Subsystems in Acoustic Materials, In: Prof., Dr. Janko Hodolič (szerk.) Scientific Conference with International Participation (ETIKUM 2017) Novi Sad, Szerbia : University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department of Production Engineering (2017) pp. 1-4. , 4 p.

8.2 További tudományos közlemények (opcionális)

Értekezéshez nem kapcsolódó további cikkek a PhD tanulmányok alatt:

- P10. Szuchy, P.; Molnár, T.; Bíró, I.; Csikós, S.; Gogolák, L.; Sárosi, J.: Bending Fatigue Tests of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composite Plates, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 18 : 2 pp. 199-213. , 15 p. (2021) DOI: 10.12700/APH.18.2.2021.2.11
- P11. Bíró, István; Szuchy, Péter; Livia, Cvetityanin: Változó keresztmetszetű tartók alakváltozása peremérték problémájának speciális transzformációja kezdeti érték problémává, In: Baksa, Attila; Bertóti, Edgár; Kiss, László; Szirbik, Sándor (szerk.) XIII. Magyar Mechanikai Konferencia : Az előadások összefoglalói Miskolc-Egyetemváros, Magyarország : Miskolci Egyetem Műszaki Mechanikai Intézet (2019) 132 p. p. 22
- P12. Csikós, S.; Gogolák, L.; Molnár, T.; Szuchy, P.; Bíró, I.; Sárosi, J.: Modelling the Fuel Consumption in Hybrid and Electronic Airplanes Using Matlab Aerospace Toolbox JOURNAL OF MECHATRONICS AUTOMATION AND IDENTIFICATION TECHNOLOGY 4 : 4 pp. 12-17. , 6 p. (2019)
- P13. Gogolák, László; Csikós, Sándor; Molnár, Tamás; Szuchy, Péter; Bíró, István; Sárosi, József: Possibilities of optimizing fuel consumption in hybrid and electronic airplanes, ANALECTA TECHNICA SZEGEDINENSIA 13 : 2 pp. 65-76. , 12 p. (2019) DOI: 10.14232/analecta.2019.2.65-76
- P14. Molnár, T.; Szuchy, P.; Csikós, S.; Gogolák, L.; Bíró, I.; Sárosi, J.: Investigation of Mechanical Characteristics of Plastic Composites, ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – BULLETIN OF ENGINEERING 12 : 3 pp. 21-24. , 4 p. (2019)
- P15. Molnár, T.; Szuchy, P.; Csikós, S.; Gogolák, L.; Bíró, I.; Sárosi, J.: Material Tests and Analysis of Aircraft Materials, ANNALS OF FACULTY OF ENGINEERING HUNEDOARA - INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING 17 : 1 pp. 95-100. , 6 p. (2019)
- P16. Csikós, Sándor; Molnár, Tamás ; Szuchy, Péter; Gogolák, László ; Bíró, István; Sárosi, József: Vibrational tests and analysis on materials used in aircraft, ANALECTA TECHNICA SZEGEDINENSIA 12 : 2 pp. 32-36. , 5 p. (2018) DOI: 10.14232/analecta.2018.2.32-36