

# Akusztikus metaanyag kutatás a Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Karán

## Experimental system of Acoustic Metamaterials in the University of Szeged, Faculty of Engineering

Szuchy, Péter

Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Szeged, Magyarország

szpeter@mk.u-szeged.hu

**Összefoglalás** — A veszélyes és ártalmas vibrációk elleni védekezés egyre égetőbb probléma világszerte. Emiatt jelentős erőfeszítések történnek az akusztikus metaanyagok kutatása és fejlesztése terén. Ezen anyagok egyik típusának működési elve a tömeg-a-tömegben alrendszer, ami a dinamikus rezgéscsillapítás továbbgondolt változata. Ennek a cikknek az elsődleges célja, hogy bemutassa a Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Karán folyó metaanyag kutatások első lépéseit, rövid összefoglalót adva az elméletről, bemutatóva a nemrég vásárolt eszközparkot és a tervezett kísérleti összeállítást. Feltárja a különbséget az elmélet és a gyakorlati eredmények között és leírja a kutatás jelenlegi problémáit, fókuszálva a gyakorlati részre. Röviden kitér a szimulációs szoftverre, ami a kísérletek számának csökkentése szempontjából fontos. A cikk másik célja az, hogy felvázolja a szerző tavaly megkezdett PhD munkájának jelenlegi állását és a tervezett lépéseket.

**Kulcsszavak:** akusztikus metaanyagok, vibráció csökkentés, töme-a-tömegben, PHOTON+

**Abstract** — Protection against the dangerous and harmful vibration is an urgent problem all around the world. There are significant efforts for researching and developing acoustic metamaterials. One of this materials' working principle is the mass-in-mass subsystem that is an improved version of the 2-Degree-of Freedom system of the dynamic vibration reduction. The main goal of this paper is to introduce the research work's first steps on this field of the University of Szeged, Faculty of Engineering, with a short review of the theory, presenting the recently purchased instruments and the planned experimental system. It reveals the gap between the theory and the research results and features the present problems of the research, bringing into focus the practical side of it. It shortly introduces the simulation software that is going to be used to reduce the number of the experiments. The other goal of this paper is to demonstrate the present state of the author's last year began PhD work and the planned further steps.

**Keywords:** acoustic metamaterials, vibration reduction, mass-in-mass, PHOTON+

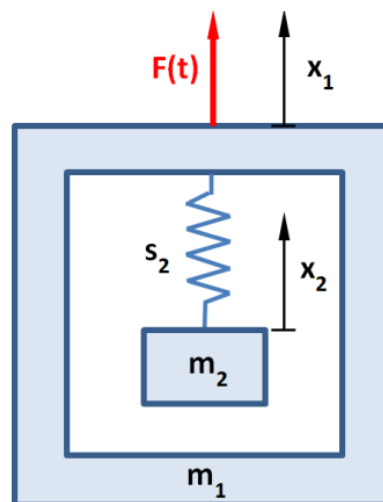
### 1 BEVEZETÉS

Az akusztikus rezgések egy része igen ártalmas hatásokkal jár, legyen az nagy energiájú rezgés, mint egy földrengés, vagy kis energiájú, mint a gépjárművek keltette vibráció. A leggyakrabban előforduló veszélyes rezgés mégis a zaj, ami körülvesz minket szinte minden pillanatban. Hatása lehet enyhébb esetben csak fáradtság,

stressz, fokozott esetben magas vérnyomás, emésztési rendellenesség, de akár halláskárosodáshoz is vezethet. A zaj elleni védekezés egyik útja az, hogy szigetelést állítunk a rezgés útjába, viszont ennek tömege hatványozottan nő zajszigetelési képességének emelésével, így pl. 30dB-lel történő hatékonyság javuláshoz legalább 32-szeresére kell növelni az abszorber tömegét:

$$\text{Transmission Loss} = 10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{\pi \rho h f}{c \rho_\alpha} \right)^2 \right] \quad (1)$$

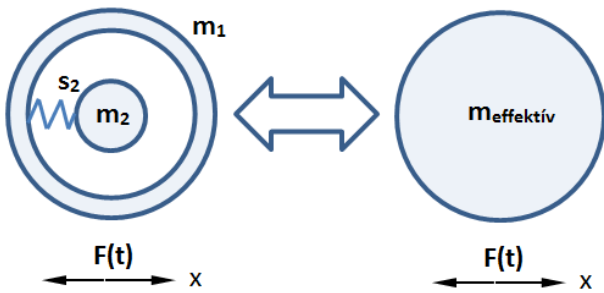
ahol  $\rho$  az abszorber sűrűsége,  $h$  az anyag rétegvastagsága,  $f$  a frekvencia,  $\rho_\alpha$  a levegő sűrűsége és  $c$  a hang terjedési sebessége a levegőben) [1]. Emiatt az utóbbi évtizedben jelentősen megnőtt az alternatív hangszigetelő anyagok, köztük a metaanyagok kutatására fordított energia. Metaanyagnak nevezzük azokat az anyagokat, amelyek jellemző tulajdonságát inkább a belső szerkezete szabja meg, mint az anyagi jellemzői. A tömeg-a-tömegben elrendezésű metaanyagok alapegységét egy speciális, két szabadságfokú rezgő rendszer alkotja (1. ábra) [2], amelyből megalkották az effektív tömeg (2. ábra) elméletét.



1. ábra: Tömeg-a-tömegben modell

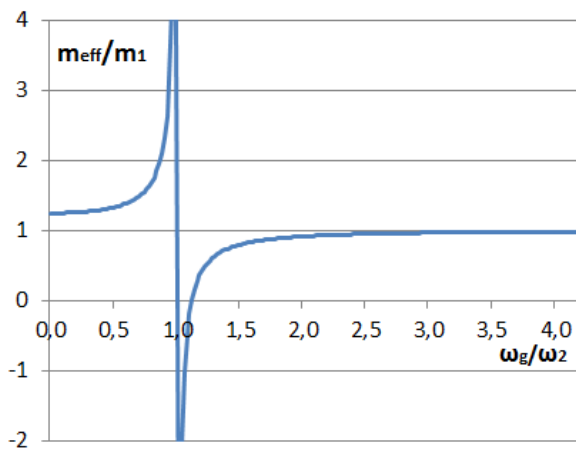
Ennek lényege az, hogy megfelelő paraméterezés mellett létezik olyan gerjesztési frekvencia, ahol az  $m_1$  tömeg áll, vagy a gerjesztésre ellentétes mozgással reagál. [3-6].

$$m_{eff} = m_1 + m_2 \frac{1}{1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2}} \quad (2)$$



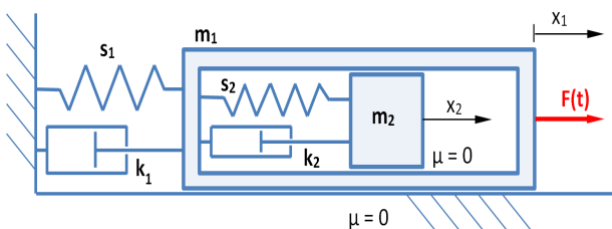
2. ábra: Tömeg-a-tömegben modell

A képlet alapján felrajzolható a gerjesztési frekvencia függvényében az effektív tömeg (3.ábra). A csatolt tömeg sajátfrekvenciáját követő szűk sávban fogunk negatív effektív tömeggel szembesülni, azaz a külső tömeg a gerjesztési frekvenciával ellentétes irányú mozgást fog végezni.



3. ábra: Tömeg-a-tömegben modell

A tömeg-a-tömegben rendszerű metaanyagoknak a működési elve nagyban hasonlít a dinamikus rezgés-csillapításéhoz (4. ábra)[7], amelynek mozgásegyenleteit lineáris anyagjellemzők mellett forgóvektoros formában oldottam meg.



4. ábra: Dinamikus rezgés-csillapítás modellje

A két tömeg közötti fáziskésés a következő egyenlettel írható le:

$$\varphi_2 = \arctan \frac{\frac{\omega_g}{\omega_2}}{\frac{1}{2D_2 \left(\frac{\omega_g}{\omega_2}\right)^2} - \frac{1}{2D_2} + 2D_2} \quad (3)$$

és a két tömeg közötti amplitúdóarány:

$$G_{21} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\sqrt{\left(2D_2 \frac{\omega_g}{\omega_2}\right)^2 + 1}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_2^2}\right)^2 + \left(2D_2 \frac{\omega_g}{\omega_2}\right)^2}} \quad (4)$$

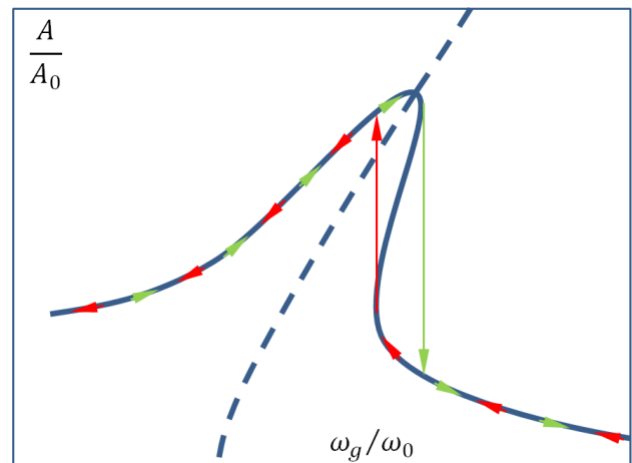
Ha a rugóerők és a csillapítási erők lineárisan változnak az elmozdulás és a sebesség változásával, akkor a harmonikus mozgás egyenletei analitikusan megoldhatóak, míg ha a változások nem-lineárisak, akkor csak közelítő eljárások léteznek.

A nem-lineáris rugó-karakterisztikájú, viszkózus csillapítású, egy szabadságfokú rezgés mozgásegyenletét először G. Duffing írta fel és oldotta meg megközelítően, még 1918-ban [8]:

$$\ddot{x}(t) + ax(t) + \mu x^3(t) + \lambda \dot{x}(t) = F(t) \quad (5)$$

Látható, hogy a nem-lineáris rugó-karakterisztikát harmadfokú függvényvel írta le.

Forgóvektoros ábrázolásban a Duffing egyenlet tartalmaz egy olyan tagot, amely nem a többi vektorral azonos szögsebességgel forog, hanem annak háromszorosával. Emiatt, valamint amiatt, hogy az elmozdulás, sebesség és gyorsulás vektorok között nem állandó a fáziskésés, a nem-lineáris megoldás forgóvektorral is csak közelítő lehet.

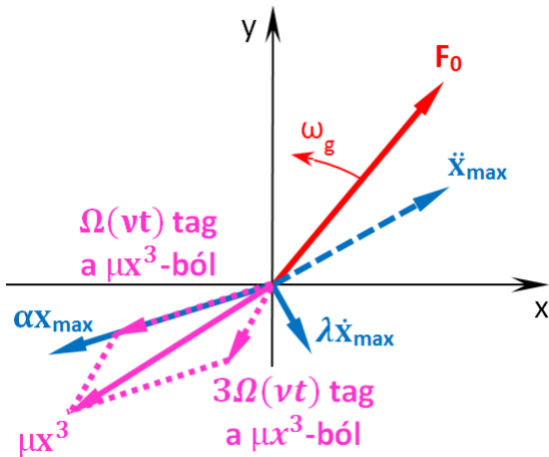


5. ábra: Nem-lineáris rugómerevségű rezgő rendszer rezonancia-viszonyai

A 5. ábra mutatja be a nem-lineáris, progresszív rugómerevségű rezgő rendszer rezonancia viszonyait [8]. A zöld nyíl jelzi az amplitúdó alakulását a gerjesztési frekvencia növelése mellett, míg a piros nyíl annak csökkentése esetén tapasztalható maximális kitéréseket mutatja. Látható, hogy mindkét irány tartalmaz egy ugrást, ahol az instabil rész átugrásával folytatja az útját a görbe. Az ábra legfontosabb része viszont a szaggatott vonal jobbra dőlése, amely egy viszonylag széles frekvenciasávú rezonancia jelenséget mutat. Ez a lineárishoz képest tágabb sáv szélességű rezgés-csökkentést tesz lehetővé.

A 6. ábrán látható a Duffing egyenlet forgóvektoros ábrázolása. A lineárishoz képest egy  $\mu x^3$  taggal bővült az egyenlet, amely nem a többi vektorral azonos  $\Omega(vt)$  szögsebességgel forog. Ezt a tagot fel lehet bontani két vektorra, mindkettő az elmozdulással egyenesen arányos, az egyik  $\Omega(vt)$ , a másik  $3\Omega(vt)$  szögsebességgel forog. Ez

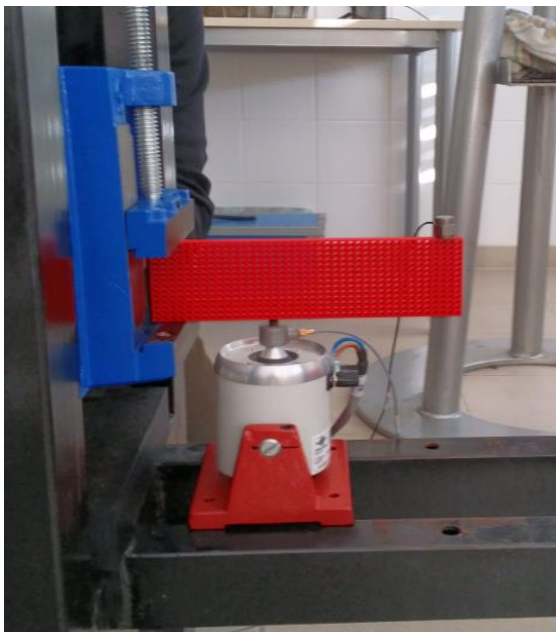
persze elegendő ahhoz, hogy analitikus megoldása forgóvektorral se legyen az egyenletnek, viszont közelítő megoldás több is létezik.



6. ábra: Nem-lineáris rugókarakterisztikájú egy-szabadságfokú rezgő rendszer erőinek forgóvektoros ábrázolása

## 2 MÉRŐRENDSZER BEMUTATÁSA

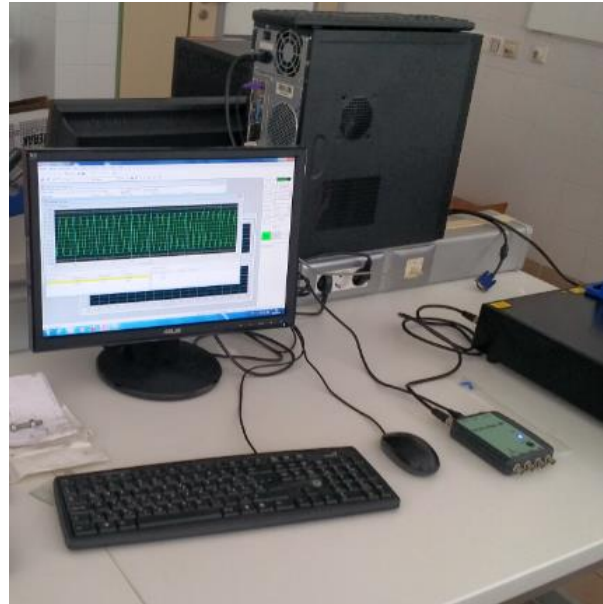
A kísérletek elvégzéséhez az elmúlt év során a Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Karán komoly beruházások történtek közbeszerzési eljárás lefolytatásával, ami hihetetlen idő- és munkaiágenes folyamat volt, köszönet érte minden résztvevőnek, akiknek volt türelmük ezt lejátszani és sosem adták fel a reményt, hogy egyszer a végére érünk.



7a. ábra: Rázógép a metanyag vázzal

A beszerzések eredményeképpen a következő eszközök állnak rendelkezésünkre a rezgéscsillapítás mérésére (7a-b.ábra):

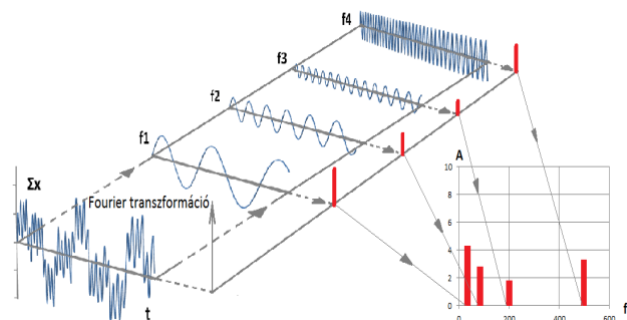
- Brüel&Kjaer PHOTON+ dinamikus jel analizátor
- Brüel&Kjaer LDS VDS 200 rázó gép, V201 tartó egységgel
- Brüel&Kjaer LDS LPA100 erősítő
- erőmérők, gyorsulásmérők
- tartó szerkezet



7b. ábra: PHOTON+ dinamikus jelanalizátor

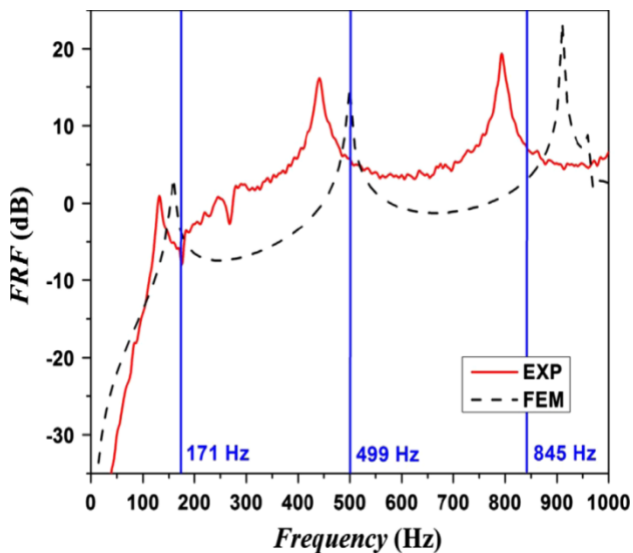
Mint azt már korábban említettem, az általunk vizsgált metaanyag működési elve a dinamikus rezgéscsillapításéhoz hasonló, csak tömeg-a-tömegben elrendezésben. Ennek megfelelően létezik egy külső, üreges hordozó váz, az  $m_1$  tömeg, ami a periodikus gerjesztést kapja. Ebben a vázban vannak célszerű geometriai alakzatban elhelyezve különböző, úgynevezett csatolt tömegek ( $m_2, m_3, m_4$  stb.), amelyek átveszik a váz rezgését, ha a gerjesztési frekvencia nem sokkal haladja meg a saját frekvenciáikat, ezzel nagymértékben lecsökkentve a váz rezgési amplitúdóját.

A mérés során a 3D nyomtatóval előállított metaanyag vázban rögzítjük a csatolt tömegeket, és adott frekvenciatartományban változtatva a gerjesztés frekvenciáját mérjük a rezgéscsillapítást. Az 7a. ábra baloldali képén látható a kék satuba befogott, piros színű metaanyag, amely a rezgés csillapítását végzi.



8. ábra: Fourier transzformáció

Alatta helyezkedik el az LDS V200 rázó gép, amely maximálisan 17,8 N nagyságú erővel és max. 5 mm amplitúdóval képes a mintadarabot rezgetni a jelgenerátor által kiadott frekvencián és jelformátumban 10-13000 Hz tartományban. Az akusztikus rezgések szempontjából a 100-1000 Hz tartomány jelenti a célterületet, itt a legártalmasabbak a rezgések. A PHOTON+ jelgenerátor vezérli a rázó gépet az LDS LPA erősítőn keresztül, valamint fogadja és feldolgozza az erőmérő és gyorsulásmérő jeleit is. A PHOTON+ egy jelgenerátor és valós idejű, gyors Fourier transzformációval (8. ábra) (FFT) dolgozó elemző készülék, melynek segítségével Frekvencia Válasz Függvényt (Frequency Response Function, FRF) állítunk elő a kimeneti (output) és a bemeneti (input) jelek arányában. Kimeneti jelként fogjuk használni mindenekelőtt azt a szinuszos jelet, ami a rázó gép vezérlését végzi, valamint a rázó gépre közvetlenül felhelyezett erőmérőt (8230 DeltaTron Force Transducer). Válaszjelként (bemeneti jelként) érkezik annak a gyorsulásmérőnek a jele, amit a metaanyagra helyezünk fel.



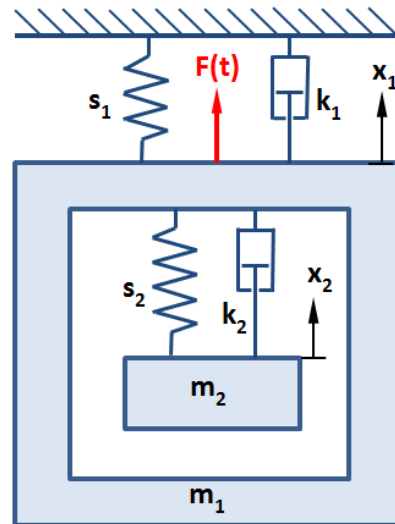
9. ábra: Kísérleti berendezés által mért Frekvencia Válasz Függvény (FRF) [9]

Mindezek értékeiből kapjuk meg a Frekvencia Válasz Függvényt, amelynek a beszakadásai, azaz a rezgést csillapító hatása ott fog jelentkezni, ahol a gerjesztési frekvencia éppen meghaladja a csatolt tömegek sajátfrekvenciáit. Lineáris rugó-karakterisztika esetén ezek keskeny, meredek falú beszakadások, míg nem-lineáris esetben kiszélesednek, tágabb frekvencia-tartományban csillapítják a rezgést (9. ábra).

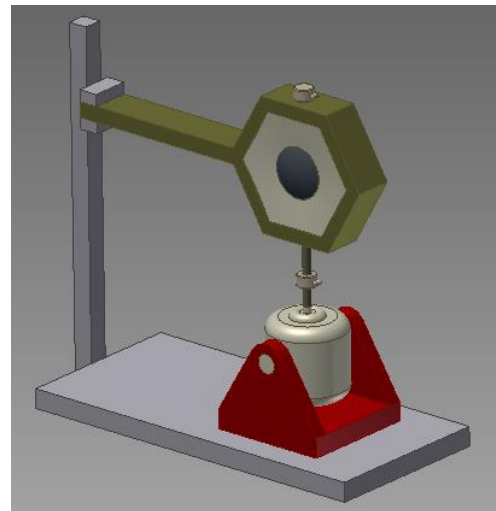
### 3 KÉT SZABADSÁGFOKÚ ALRENDSZER REZGÉSCSILLAPÍTÁSNAK MÉRÉSE

A kísérletek során először egy két szabadságfokú rezgő rendszert (10., 11. ábra) fogunk vizsgálni. Ez a tömeg-a-tömegben elrendezésű rendszer adja a keresett metaanyagok alapegységét, így ezek számítása és mérése a legegyszerűbb. A vizsgálatok segítségével összefüggést kell találnunk az elméleti számítások és a gyakorlati eredmények között, valamint itt kell begyakorolnunk a mérési eljárás technikáját is. Mivel a méréshez felhasznált eszközök (gyorsulásmérők, erőmérők) jelenléte (tömege) befolyásolja a mérések eredményét, ezért ki kell dolgoznunk azokat a korrekciós számításokat, melyek

segítségével kiküszöbölhetjük azok torzító hatásait. Ki kell dolgoznunk azt a módszert is, amivel a merevnek tekintett testek között használt ragasztó rugómerevségét ( $s_2$ ) és csillapítási tényezőjét ( $k_2$ ), valamint a periodikusan gerjesztett  $m_1$  tömeg megfogására használt szakasz rugómerevségét ( $s_1$ ) és csillapítási tényezőjét ( $k_1$ ) is meg tudjuk határozni. Feltehetőleg a rugómerevség lesz az egyszerűbb, hiszen rugókarakterisztikát fel tudunk vázolni a többféle terhelésre adott elmozdulások alapján.



10. ábra: Két szabadságfokú, tömeg-a-tömegben elrendezésű rezgő rendszer modellje



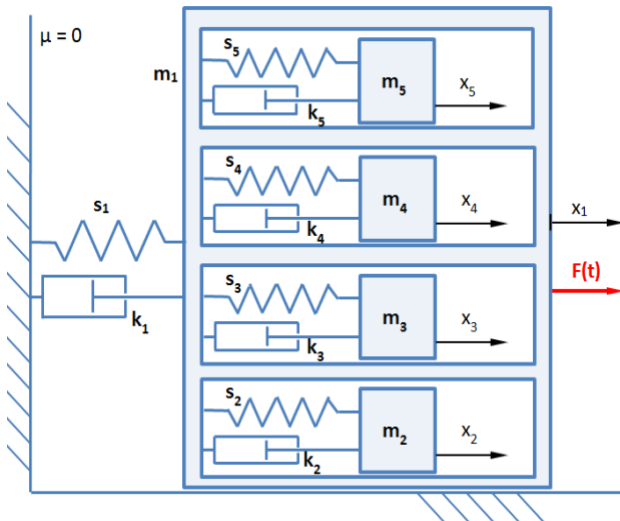
11. ábra: Két szabadságfokú, tömeg-a-tömegben elrendezésű rezgő rendszer rezgéscsillapításának mérési elrendezése

Az erő biztosítására a rázó gép is felhasználható konstans jel ráadásával, az elmozdulás mérésére lézeres elmozdulás érzékelő lenne a leg célra vezetőbb, ami az alap mérőrendszer esetében is célravezetőbb lenne a tömeggel bíró gyorsulásmérőknél, hiszen ez nem befolyásolná a mérést. A csillapítási tényező kiszámítására valószínűleg az egyszeri, impulzus jellegű gerjesztés lecsengésének mérése biztosítja majd a lehetőséget.



#### 4 TÖBB SZABADSÁGFOKÚ ALRENDSZER REZGÉSCSILLAPÍTÁSNAK MÉRÉSE

Megvalósíthatósági, azaz gyárthatósági szempontból olyan metaanyag képzelhető el, amelyben 4-5-féle csatolt tömegnél nincs több. Ha mindegyik kellően széles sávban tud csillapítani, amihez célszerűen választott nem-lineáris rugókarakterisztikákra lesz szükség, akkor valószínűleg lefedhető lesz vele egy legalább 600-800 Hz szélességű frekvenciatartomány, ami már használható szintű vibrációcsökkentő anyagot eredményezhet.



12. ábra: Öt szabadságfokú rezgő rendszer tömeg-a-tömegben elrendezésű modellje

Ennek megfelelően a periodikusan gerjesztett  $m_1$  tömeghez kapcsolt  $m_2, m_3, m_4, m_5$  tömegek tömeg-a-tömegben elrendezésű metaanyag modellje az 12. ábrán látható. Mivel ilyen elrendezésben még lineáris anyagjellemzőkkel sem történt még meg a mozgási egyenletek megoldása, így az elméleti munkának ez lesz a következő lépése. Azt tudjuk, hogy ha csak egy tömeget csatolunk a rezgő alap tömeghez, akkor megfelelő méretezés mellett megállíthatjuk vagy minimálisra redukálhatjuk az alap tömeg rezgését. Viszont még nem ismert, hogy mi történik, ha a csatolt tömeget megsokszorozzuk (több azonos csatolmány), vagy több, eltérő tömeg-rugó-csillapítás kerül csatolásra.

#### 5 SZIMULÁCIÓS ELJÁRÁSOK

A mérések számának csökkentése céljából szükségünk lesz egy szimulációs szoftverre. A Mérnöki Karon oktatott és így rendelkezésünkre álló Autodesk Inventor rendelkezik bizonyos végeelem számításokra képes modulokkal (feszültség-, alakváltozási, sajátfrekvencia számítások), de sem Frekvencia Válasz Függvény (FRF), sem nem-lineáris anyagjellemzők nem állíthatók elő vele. az ANSYS szoftverrel történtek biztató próbálkozások, s bár ez a szimulációs szoftver képes bizonyos területeken nem-lineáris anyagmodellel dolgozni, sajnos a számunkra fontos FRF modulban nem. Ennek a szoftvernek viszont hátrányai közé tartozik, hogy a bekerülési és éves rendszerkövetési költsége magas, s helyes kezelése igen komoly szintű gyakorlottságot igényel, amelynek az elsajátítása rendkívül időigényesnek tűnik. Így a szoftveres szimuláció kérdése egyelőre még nem megoldott.

Igen sokat támaszkodunk viszont a numerikus integrálásra, aminek a lehetőségét az Excell nyújtja számunkra. Nagy segítség az analitikus levezetések helyességének igazolására, de sokat használjuk a mozgások megismerésére is, a paraméterek változtatása mellett.

További lépésként igyekszünk a MATLAB szoftvert is bevenni a szimulációkba, itt még csak a kezdeti lépéseknél tartunk.

#### 6 ÖSSZEZÉS

Mindenképpen elmondható, hogy a metaanyag kutatás rendkívül izgalmas részéhez értünk, hiszen ez az a pont, ahol az összegyűjtött elméleti tudást le kell tudni fordítani gyakorlati eredményekre. A két és több szabadságfokú rezgő rendszer, a tömeg-a-tömegben elrendezés, a lineáris-nemlineáris anyagtulajdonságok közötti különbségek a megalkotott rezgés-csillapítást mérő rendszerrel visszaigazolást kell, hogy kapjanak ahhoz, hogy a további lépésekre sor kerülhessen. Később számolnunk kell még a hordozó váz geometriájának a kialakításával, a csatolt tömegek méretezésével és elhelyezésével, a megfelelő anyagok kiválasztásával és nem utolsósorban a méretek csökkentésének problémájával. Összegzésként elmondható, hogy nagy utat tettünk meg az elmúlt évben, viszont a kutatásnak még mindig csak az elején járunk.

#### IRODALOMJEGYZÉK

1. Pai P.F.: Metamaterial-based broadband elastic wave undamped vibration absorber. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 21(5) (2010) 517-528.
2. 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.
3. Cveticanin, L., Mester, Gy: Theory of acoustic metamaterials and metamaterial beams: An overview, *Acta Polytechnica Hungarica*, 13(7), 2016, 43-62.
4. Bíró, I.: Mechanikai lengések, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Szeged, 2014. 122 p. ISBN:978-963-306-288-3
5. 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.
6. Pai, P.F., Peng, H., Jiang, S.: Acoustic metamaterial beams based on multi-frequency vibration absorbers, *International Journal of Engineering Science*, 79, 2014, pp. 195-205.
7. Hegedűs, A.: Fejezetek a kinetikából Rezgéstan, Szent István Egyetemi Kiadó, Gödöllő, 2015. ISBN:978-963-269-468-9
8. 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.
9. 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.