

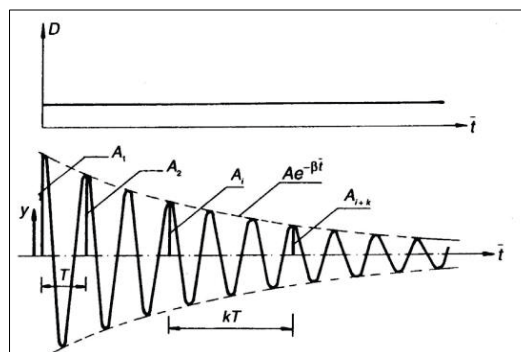
REZGÉSCSILLAPÍTÓ ANYAGOK VISELKEDÉSE ALACSONY HŐMÉRSÉKLETEN

VIBRATION DAMPING MATERIAL BEHAVIOUR AT LOW TEMPERATURE

Bozzay Péter*, Prof. Dr. Jármay Károly**, Dr. Virág Zoltán***

ABSTRACT

Vibration damping plays a vital role in cyclic loadings. There are a significant number of different dampers available. Their material properties can change significantly at low temperatures. The research aims to determine the characteristic behaviours of a rubber strap with canvas linings. We determine the loss factor of the material at different temperatures between $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ —also the static and the dynamic shear modulus. We use the Brüel & Kjaer measuring devices to change the cyclic loadings and the vibration frequencies. A special refrigerator is available to provide low temperatures down to $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. The measurements were made using fabric conveyor belt specimens.



1. ábra, Szabad rezgés konstans csillapítás mellett

1. BEVEZETÉS

A rezgések az esetek döntő többségében valamilyen berendezés üzemeltetése során keletkező ciklikus, dinamikus hatások okozta járulékos, nemkívánatos jelenségek, amelyek jellegüktől és intenzitásuktól függően idővel kedvezőtlen hatással lehetnek magára a berendezésre, a környezetére és akár az ott tartózkodó emberekre is. Ebből kifolyólag a rezgéscsillapítás nagyon fontos szerepet játszik akár ciklikus, akár impulzusszerű terhelések ilyen kedvezőtlen hatásainak csökkentésében, ideális esetben megszüntetésében.

Különösen intenzív, akár destruktív hatásokat okozhat a rezonancia jelensége. Minden berendezés rendelkezik egy vagy több, a szerkezeti kialakítására, anyagminőségére jellemző sajátfrekvenciával. Gerjesztés hatására a szerkezeti elemek rezgésbe jönnek és ezek a sajátfrekvenciák lesznek a spektrum azon részei, amelyek domináns kiemelkedő rezgésszinteket mutatnak, illetve a gerjesztés megszüntetése után a leghosszabb idő alatt csillapodnak le teljesen. Lényegében ezeken a frekvenciákon lehet a legkisebb gerjesztési energiával a legnagyobb hatást elérni. A gerjesztés megszűntetése utáni szabad – sajátfrekvenciájú – rezgés csillapításának jellemzője a logaritmusos dekrementum (δ), amely két egymást követő amplitúdó hányadosának viszonyozása. Konstans csillapítás mellett az 1. ábra szerint. [1]

Általánosítva

$$\delta = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{A_i}{A_{i+k}} \quad (1)$$

A csillapítási tényező

$$\eta = \frac{\delta}{\pi} \quad (2)$$

Ha a sajátfrekvenciának megfelelő gerjesztést folyamatosan fenntartjuk és a gerjesztő jel fázisa – konstans amplitúdó mellett – megfelelően viszonyul a már rezgő szerkezeti elem mozgásfázisához, akkor annak amplitúdóját öngerjesztő folyamatként fokozatosan tovább növeli (2. ábra), rezonancia jelensége lép fel, amely mértékének csak a szerkezetre jellemző csillapítás szab határt. Elméleti szélső esetben, ha ez a csillapítás nulla, akkor a rezgés amplitúdója végtelen nagyságú, végtelen csillapítás esetén pedig nulla. A gyakorlatban ez jellemezhető a rezonancia-nagyítással (ν), amit a gerjesztő jel (A_g) és a válaszjel (A_v) nagyságának aránya ad meg. [2]

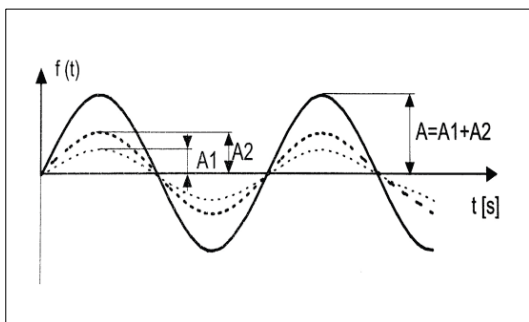
$$\nu = \left| \frac{A_v}{A_g} \right| \quad (3)$$

ahol rezonancia esetén $\nu \gg 1$

* tanszéki mérnök, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

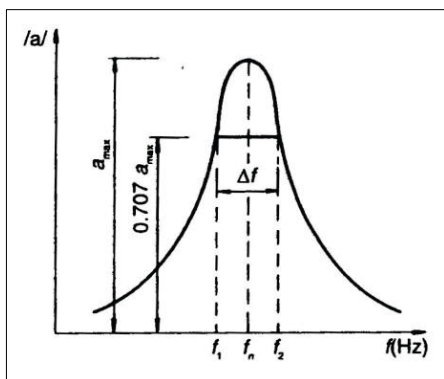
*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Bányászati és Energia Intézet



2. ábra, Egyirányú harmonikus rezgésen erősítése

Hogy a gyakorlatban egy adott gerjesztés hatására végül mekkora maximális rezgésamplitúdó keletkezik, azt a szerkezetre jellemző csillapítási tulajdonságok korlátozzák. A csillapítás mértékének számszerűsítésére többféle módszer áll rendelkezésre, ezek közül a vizsgálatok során az Oberst-féle módszert alkalmazzuk. Ez esetben a csillapítási tényező értékét a rezonancia frekvencia (f_n) és az ehhez tartozó amplitúdóhoz (a_{max}) képest 3 dB csillapítású ($1/\sqrt{2}=0,707$ -szeres, félteljesítményű) frekvenciaértékek (f_1 és f_2) különbségének aránya adja meg (3. ábra). [1]

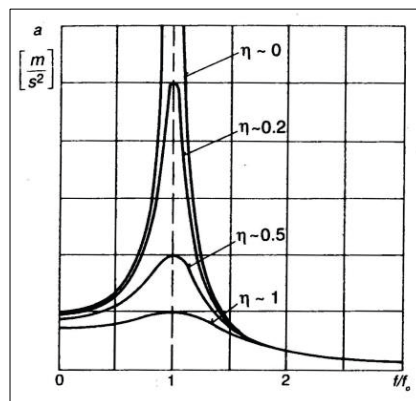
$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_n} = \frac{\Delta f}{f_n} \quad (4)$$



3. ábra, Csillapítási tényező Oberst alapján

Ha a gerjesztett rezgés mértéke a megengedhetőhöz képest túlságosan nagy, akkor rezgés csillapítás alkalmazása szükséges, akár a rezonancia, akár az azon kívül eső frekvenciatartományokban. Erre számos lehetőség áll rendelkezésre, mint például:

- (váz)szerkezet konstrukciós és anyagszerkezeti kialakítása,
- forgógép hajtásának mechanikai és villamos kialakítása,
- csillapító eszközök beépítése (rugók, lengéscsillapítók, tömegek, stb.),
- csillapító anyagok alkalmazása (gumik, habok, kompozitok, stb).



4. ábra, Rezonancia görbék különböző csillapítási tényezőknél

A 4. ábra szerint η minél nagyobb értéke kívánatos a rezonancia nemkívánatos hatásainak elkerüléséhez.

2. A GUMIHEVEDER VIZSGÁLATA

E kutatás célja az adott csillapítás hőmérsékletfüggésének vizsgálata, mely a felsoroltak közül elsősorban a csillapító anyagokra vonatkozatható, mivel ezek anyagszerkezeti tulajdonságai szélsőséges hőmérsékleteken jelentősen megváltozhatnak. Ezt figyelembe kell venni, ha a csillapított szerkezet például extrém hideg téli klímájú vidéken, vagy repüléstechnikában kerül alkalmazásra.

Más megközelítésből e kutatás célja jelenleg az, hogy a rendelkezésünkre álló eszközrendszerrel kidolgozzuk a szükséges vizsgálati módszert és ezt a gyakorlatban teszteljük. Így ebben a fázisban még nem elsősorban az eredményeknek a vizsgált anyagra vonatkoztatott abszolút tudományos precizitása a cél, hanem a tapasztalatszerzés a módszer, a gerjesztő- és adatgyűjtő eszközök, illetve a mérésiértékelő program alkalmazhatóságáról, beleértve a további fejlesztési lehetőségeket, igényeket is. A vizsgálat tárgya az EGK Kft által rendelkezésünkre bocsátott ENERGUM EP/630/4, 10+2 mm-es vászonbetétes szállítószalag hevederből (5. ábra) készült próbatest, melynek főbb tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza. [5]

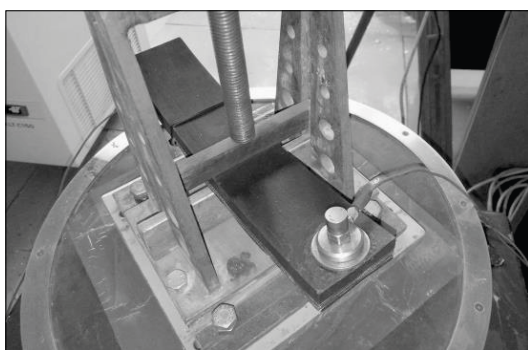


5. ábra, Energum EP/630/4 heveder keresztmetszete

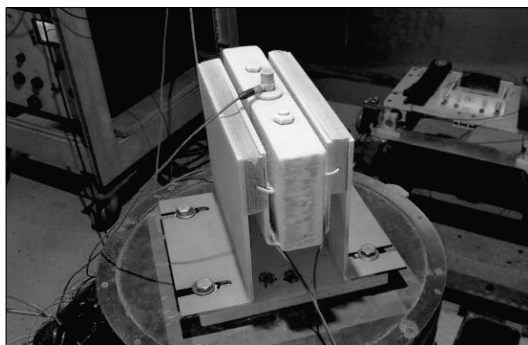
1. táblázat
Energum EP/630/4 heveder főbb jellemzői

Teljes vastagság	15,5 mm
Ebből a felső + alsó fedőrétegek	10 + 2 mm
Szövetbetét anyaga	EP 160 poliészter/poliamid
Üzemi hőmérséklet	-30...+80 °C
Tömeg	18,5 kg/m ²
Próbatest mérete	250 x 50 mm

Ezzel kétféle mérést végeztünk, egyik esetben egyszerűen csak magát a gumiheveder darabot befogva (ciklikus hajlító igénybevétel), másik esetben Jones-féle próbatestként (ciklikus nyíró igénybevétel), ezek a 6-7. ábrákon láthatók.



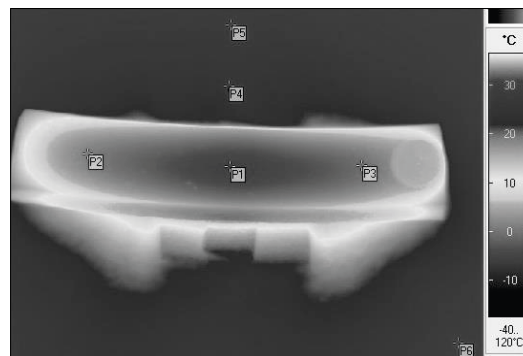
6. ábra, Egyszerű próbatest a shaker-en



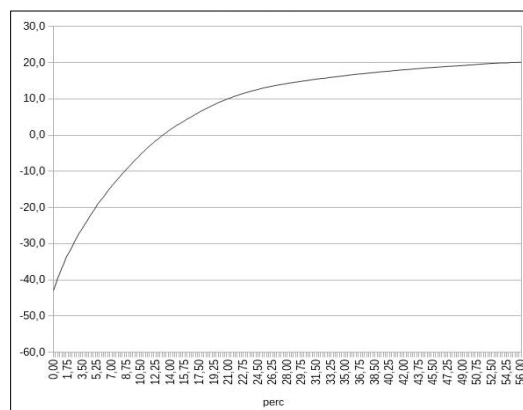
7. ábra, -40 °C fokos Jones próbatest a shaker-en

Próbatestek extrém lehűtéséhez egy VT147 típusú ultramélyhűtő áll rendelkezésünkre, amellyel -62 °C érhető el. Ezzel a vizsgálat jelenleg csak úgy történhet, hogy a próbatestet behelyezzük, lehűtjük, majd kivéve végezzük a gerjesztést és mérést, miközben az visszamelegszik a környezeti hőmérsékletre. Ez nem ideális, egyrészt mert a próbatest hőmérséklete teljes keresztmetszetében nem homogén változik (ezt hőkamerával vizsgáltuk, 8. ábra), másrészt a változás – hőelemmel adott pontban mérve – időben nem lineáris (9. ábra) és nem szabályozható, ugyanakkor a fenti alapvető

cél elérhető ezzel a módszerrel is. Ideális megoldás egy megfelelő klímakamra lenne, ami azonban jelen gazdasági helyzetben irreális beruházási költségekkel járna.



8. ábra, Egyszerű próbatest hőképe



9. ábra, Próbatest mérőpont hőmérséklet változása

A gerjesztés – jellegét tekintve – esetünkben háromféle módon történhet:

- **Impulzussal:** Speciális mérőkalapáccsal vizsgáljuk a próbatestre mért, ismert energiájú ütés hatására a rezgés lecsengését.
- **Színuszjellel:** Visszacsatolással a teljes frekvenciasávban biztosított konstans gyorsulás mellett, meghatározott paraméterek szerint változó frekvenciájú gerjesztés történik (sweep), azaz egy időpillanatban csak egyetlen frekvenciaérték hatását vizsgálunk. Ez a módszer ebben az esetben nem ideális, mert a hőmérséklet és frekvencia folytonos, adott időtényező szerinti (ráadásul a frekvencia esetében lineáris, míg a hőmérsékletnél nem lineáris) változása, illetve az így mérhető „frekvenciapontonként” minimálisan szükséges mintavételezési idő együttes feltételrendszerében a mérési eredmények tapasztalatunk szerint nem tudják a valós viselkedést megfelelően visszatükrözni (10. ábra).

- **Fehérzajjal:** A fehérzaj a vizsgált frekvenciaspektrum minden komponensét egyforma valószínűséggel tartalmazza, így ez megfeleltethető sok egyedi szinuszos gerjesztés összességének, de ebben az esetben egy attól lényegesen, akár nagyságrendileg rövidebb időtartam alatt. Ez a mérés közben viszonylag gyorsan változó hőmérséklet miatt alapvetően fontos szempont. Ugyanakkor e változás nemlinearitásának (a rövidebb mérési idő miatt) nincs számottevő hatása a végeredményre. Ebben az esetben visszacsatolás nélkül egy konstans gerjesztési jelszintet beállítva történik a mérés. Jelen esetben a rendelkezésre álló módszerek közül ez a legjobb.

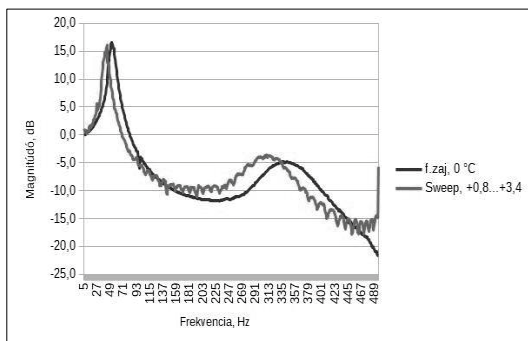
- Ennek meghajtásához B&K 2708 (1200 W-os) teljesítményerősítő.
- Fehérzaj előállításához a B&K 2034 spektrumelemző beépített jelgenerátora (szinuszjelhez B&K 1050 vezérlőgenerátor).
- Mérőműszerként NI cDAQ-9178 USB keretben NI-9234 gyorsulásmérő és NI-9219 hőmérsékletmérő modul, 2 db 100 mV/g érzékenyséű gyorsulásérzékelővel, illetve T típusú hőelemmel.
- Mérés adatgyűjtéshez NI SignalExpress szoftver
- Mérés kiértékeléshez Octave (a feladat szempontjából Matlab kompatibilis) szoftver

3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A gerjesztés mindkét fajta próbatetest esetében a fentiek szerint, fehérzajjal történt (próbaképpen szinuszjellel is, de a kapott eredmények alapján ezt elvetettük a fentiek szerint). A mérésnél az egyik csatorna a gerjesztés (stimulus), a másik a válasz (response) gyorsulásértékét mérte, a SignalExpress-ben kialakított mérőprogram pedig 15 másodperces adatátlagolásokkal határozott meg egy-egy frekvenciaválasz spektrumot az 1...850 Hz frekvencia- és a kb. -60...+20 dB magnitúdó tartományban, amely az ahhoz tartozó mért hőmérséklettel együtt számítógépen külön-külön fájlokban rögzítésre került. [3]

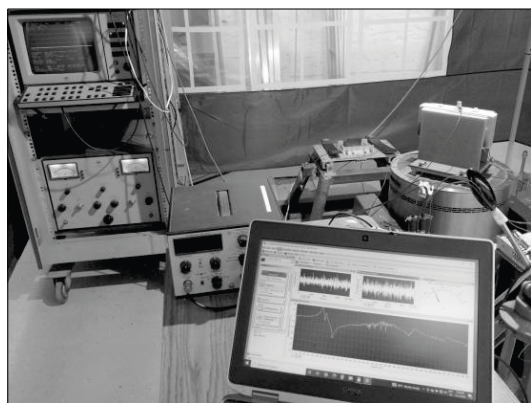
Mivel megfelelő klímakamrával (egyelőre) nem rendelkezünk, a hűtésből kivett próbatetest hőmérséklete a gyors rögzítés ellenére már növekedett, illetve aktív melegítés nélkül a környezeti hőmérséklet fölé nem melegedett (a cél alapvetően a hidegben történő viselkedés vizsgálata), így a lehetőségeinkből adódóan az egyszerű próbatestnél a bemutatott mérés esetében -43...+20 °C tartományban, a melegedés sebességéből adódóan kb. 1 óra időtartam alatt 225 fájlba rögzítve, míg a jóval nagyobb hőtehetetlenségű Jones próbatestnél kb. -53...+13 °C között, kb. 3 óra alatt és 674 fájlban tudtunk egy komplett mérést elvégezni, melyet az utóbbi esetben a shaker folyamatos üzem miatti túlzott melegedése és az alacsonyabb környezeti hőmérséklet is korlátozott.

Az egyszerű próbatetest mérési adatainak előzetes, még csak egyszerű táblázatkezelővel végzett vizsgálata (7 különböző hőmérsékleten) olyan eredményt mutatott, amely igazolta, hogy érdemes további elemzéseket



10. ábra, Fehérzaj és sweep eredmények összehasonlítása közel azonos hőmérsékleten

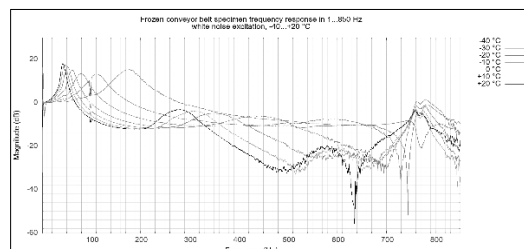
A gerjesztést egy nagy teljesítményű Brüel&Kjaer rázórendszer biztosítja, a mérésadatgyűjtést pedig egy National Instruments CompactDAQ rendszer, SignalExpress szoftverrel (11. ábra).



11. ábra, A B&K és NI gerjesztő-mérő rendszer

A főbb elemek jellemzői:

- B&K 4818 típusú, elektrodinamikus shaker: a teljes (rögzítőelemeket is tartalmazó) terheléssel >200 m/s² gyorsulás előállítására képes, ami bőven megfelel a tapasztalataink szerint ehhez a feladathoz elegendő 10-15 m/s²-hez. A shaker megfelelően kialakított rezgésmentes alapon áll.



12. ábra, Egyszerű próbatetest frekvenciaválasz diagramja különböző hőmérsékleteken

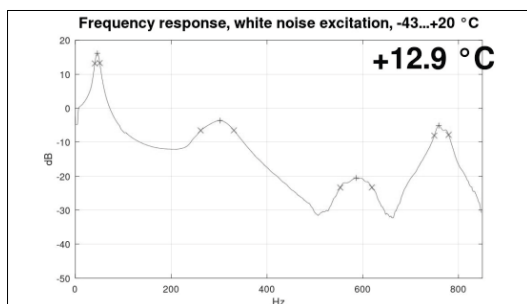
végezni. A 12. ábrán a próbatest frekvenciaválasz görbéje látható 7 különböző hőmérsékleten. Ez a diagram az a_g gerjesztő gyorsulásjel és a próbatest arra adott a_v válasz gyorsulásjel amplitúdójának viszonyát mutatja meg dB skálán a vizsgált frekvenciaspektrumban az alábbiak szerint:

$$dB = 20 \cdot \log \left(\frac{a_v}{a_g} \right) \quad (5)$$

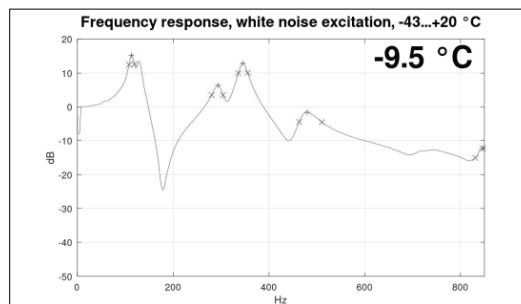
Ebből következően 0 dB esetén a gerjesztő- és a válaszeljel gyorsulás amplitúdója megegyezik, az ettől nagyobb értékek bizonyos mértékű rezonancia nagyítást jeleznek, a fentebb leírt csillapítási tényezőkkel, míg a 0 dB alatti értékek eleve csillapítást mutatnak a gerjesztő jelhez képest.

Jól megfigyelhető, hogy a hőmérséklet növekedésével az első két sajátfrekvencia jelentősen balra tolódik a spektrumban és magnitúdója valamelyest növekszik. A 100 Hz körüli, nem változó frekvenciájú „lyuk” a rendszer sajátossága, a shaker hűtőventilátorának rezgése okozza. A kb. 500 Hz feletti tartományban már a próbatest, a rögzítő szerkezet, a shaker és annak tartószerkezetének komplex viselkedése látszik, így itt a hőfokfüggés is kevésbé markáns és így a továbbiakban inkább csak az 500 Hz alatti tartományra fordítjuk a figyelmünket. A csillapítási tényező meghatározása (különösen a hőmérséklet függvényében) itt még hosszadalmas feladat lett volna, több száz fájl esetében pedig különösen az, így elkészült egy Octave (Matlab kompatibilis) program [4], amely automatikusan elvégzi:

- a fájlok egymás utáni beolvasását, és az egyes spektrum diagramok megjelenítését,
- a sajátfrekvencia csúcsok keresését és magnitúdójuk meghatározását,
- ezekből a 3 dB-es (félteljesítményű) sávzélességük meghatározását (13. és 14. ábra),
- ezekből az Oberst-féle csillapítási tényezők számítását,
- végül mindezen adatok fájlba mentését oly módon, hogy táblázatkezelőbe importálva tetszőleges további elemzéseket lehessen elvégezni rajtuk.



13. ábra, Egyszerű próbatest sajátfrekvenciái egy adott hőmérsékleten

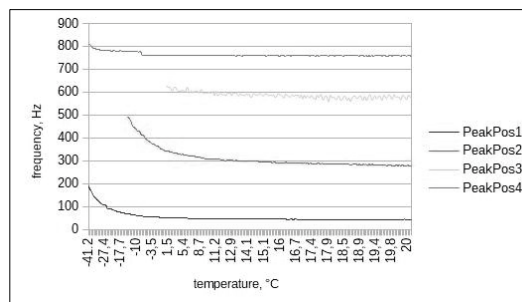


14. ábra, Jones próbatest sajátfrekvenciái egy adott hőmérsékleten

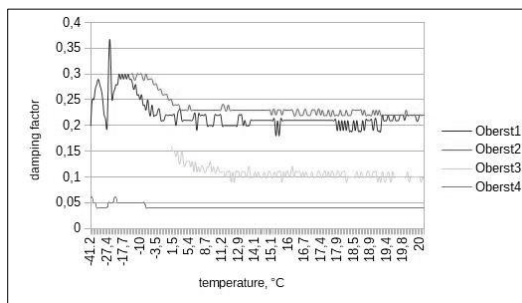
Ez alapján a sajátfrekvencia és a csillapítási tényező változása a hőmérséklet függvényében a 15-18. ábrákon látható. A diagramok hiányosságát az okozza, hogy az adott hőmérsékleten az adott sajátfrekvencia komponens amplitúdója nem éri el az Oberst-féle, 3 dB-nek megfelelő csúcsot, így azt a feldolgozó program nem veszi figyelembe, ahogy ez pl. a 14. ábra 600-800 Hz tartományában látható.

A hőmérséklettel időben változó frekvencia spektrum görbék sorozatából készült videó animáció is, amely nagyon szemléletesen teszi ezt a változást, ez az alábbi linken tekinthető meg:

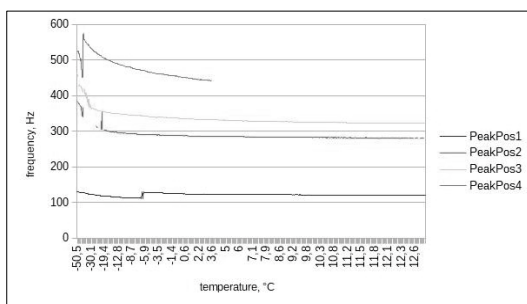
<https://www.youtube.com/watch?v=H396SwHzJV0>



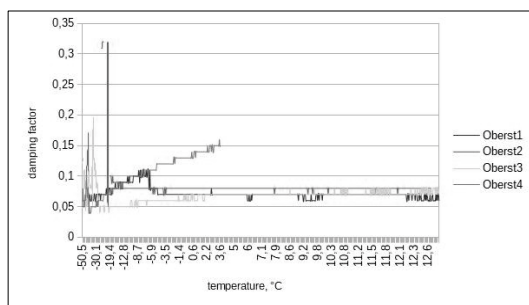
15. ábra, Egyszerű próbatest első négy sajátfrekvenciája a hőmérséklet függvényében



16. ábra, Egyszerű próbatest első négy sajátfrekvenciájának Oberst-féle csillapítási tényezője a hőmérséklet függvényében



17. ábra, Jones próbatest első négy sajátfrekvenciája a hőmérséklet függvényében



18. ábra, Jones próbatest első négy sajátfrekvenciájának Oberst-féle csillapítási tényezője a hőmérséklet függvényében

Tervezzük a kutatás kibővítését ugyanilyen gumiheveder MTS szakítógépen történő statikus és dinamikus nyírási modulusának hőmérsékletfüggő vizsgálatával, továbbá mindezen vizsgálatok más anyagú próbatestekkel történő elvégzésével is.

Az MTS szakítógép rendelkezik klímakabin opcióval, amely folyékony nitrogénnel hűthető a kívánt hőmérsékletre. Azonban ez a berendezés hidrodinamikus elven működik, így dinamikus vizsgálatokhoz a frekvenciatartománya jelentősen kisebb (kb. 10-20 Hz-ig, több tényezőtől függően), mint a B&K elektrokinetikus shaker-é (4 kHz) és mint amit az utóbbival meghatározott sajátfrekvencia értékek megkivánnának. Emiatt ennél a feladatnál a B&K shaker kiváltására sem ezen okból, sem a számottevően magasabb üzemeltetési költségei szempontjából nem alkalmas, csak néhány kiegészítő szakítóvizsgálat elvégzésére, amely a kutatás egy másik irányát nyithatja meg a későbbiekben.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elvégzett vizsgálatok azt mutatják, hogy a szállítószalag heveder anyagjellemzői jelentősen függenek a hőmérséklettől. Minusz 40 és plusz 20 °C fok között vizsgálva jelentősen változik a rezgésállító képessége és a sajátfrekvenciája is. A konkrét egyszerű próbatestnél például a hőmérséklet növekedésével az első

sajátfrekvenciája lecsökken 187 Hz-ről 38 Hz-re. A sajátfrekvencia és a rezgésállítási tényező ilyen változása meghatározó szempont lehet a gyakorlati alkalmazás vonatkozásában. A rezgésállító anyagok hőmérsékletfüggő viselkedésének alaposabb megismerésére további lehetőségeket biztosíthatnak még a klimatizált statikus és dinamikus húzóvizsgálatok is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósul meg.

Irodalom

- [1] Farkas, J., Jármái, K.: Analysis and optimum design of metal structures, Balkema Publishers, Rotterdam, Brookfield, 1997, 347 p. ISBN 9789054106692/90 5410 669 7.
- [2] Dömötör F.: Rezgésdiagnosztika I. kötet, Dunaújvárosi Főiskolai Kiadó, 2008
- [3] www.ni.com címen elérhető információs források a NI adatgyűjtő rendszer programozásához
- [4] www.octave.org , www.matlab.com címen elérhető és más internetes információs források az Octave (Matlab) mérésértékelő program elkészítéséhez
- [5] www.gummilabor.it, Energum EP/630/4 datasheet