

Nemnewtoni folyadékok alkalmazása lengéscsillapítóknban

Application of non-Newtonian liquids in shock absorbers

NAGY-GYÖRGY Péter¹, PhD hallgató; Dr. HÓS Csaba², egyetemi docens

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék,
1111 Budapest Műegyetem rkp. 3, nagy-gyorgy@hds.bme.hu, www.hds.bme.hu

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék,
1111 Budapest Műegyetem rkp. 3, cshos@hds.bme.hu, www.hds.bme.hu

Abstract

The authors developed an analytical method to determine the damping characteristic of an arbitrary non-Newtonian fluid-filled shock absorber in their previous work. This article aims to investigate the effect of different fluid rheologies (e.g. Newtonian, shear thinning, shear thickening) on vibration isolation ability using that method. The behaviour of the shock absorbers is demonstrated with a simple one degree of freedom mass-spring-damping vibration system with displacement excitation. Comparison of the obtained resonance curves shows that using a shear-thinning fluid can reduce the amplitude and energy transmissibility at higher frequencies.

Keywords: shear thickening fluid, non-Newtonian fluid, nonlinear damper, vibration isolation

Kivonat

A szerzők korábbi munkájuk során fejlesztettek egy analitikus módszert, amellyel tetszőleges nemnewtoni folyadékkal töltött lengéscsillapító csillapítási karakterisztikája számítható. Ezen cikk célja a különböző folyadék reológiák (pl. newtoni, nyírásra lágyuló, nyírásra keményedő) hatásainak vizsgálata a lengéscsillapító rezgésszigetelő képességre vonatkozóan az említett módszer segítségével. A lengéscsillapítók viselkedését egy egyszerű egyszabadságfokú tömeg-rugó-csillapítás rezgőrendszer példáján mutatjuk be, harmonikus útgerjesztés esetén. A kapott rezonanciagörbék összehasonlítása során azt tapasztaltuk, hogy nyírása lágyuló folyadék alkalmazásával a rezgés amplitúdó- és energiaátvitele csökkenthető magasabb frekvenciáknál.

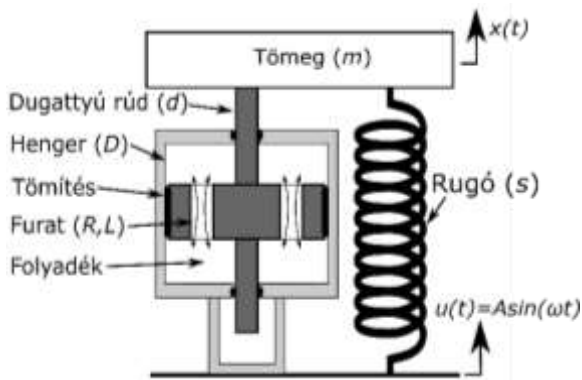
Kulcsszavak: nyírásra keményedő folyadék, nemnewtoni folyadék, nemlineáris lengéscsillapító, rezgésszigetelés

1. BEVEZETÉS

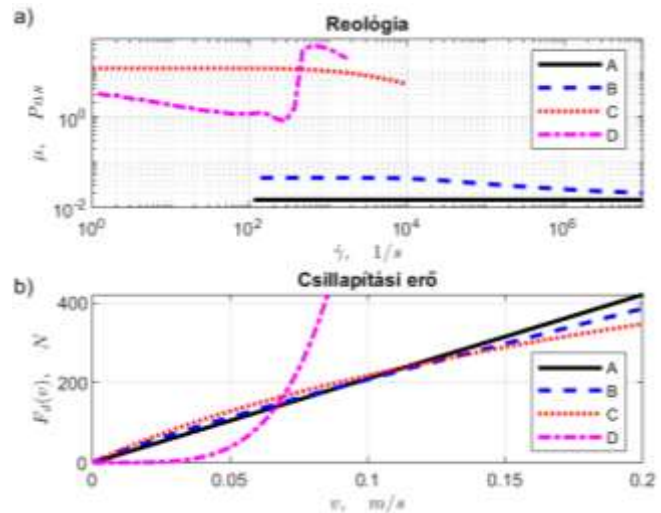
Viszkózus lengéscsillapítókat az ipar különböző területein alkalmaznak rezgésszigetelő rendszerekben, például autóipar, földrengésvédelem. Ezen eszközök működése egyszerűnek mondható: külső erők hatására a belső dugattyú két oldalán lévő folyadékkal töltött kamrákban nyomáskülönbség alakul ki, így a folyadék átáramlik a nagyobb nyomású kamrából a kisebb nyomású tér felé a kamrákat összekötő csatornán keresztül.

Hagyományosan newtoni folyadékokat (pl. víz, olaj) alkalmaznak ilyen eszközökben a könnyebb kezelhetőség miatt, viszont a növekvő rezgésszigetelési igények miatt egyre nagyobb figyelem irányul a nemnewtoni folyadékokkal töltött lengéscsillapítók felé azok nemlineáris viselkedése miatt. Az autóiparban egyre többször találkozhatunk magnetoreológikus és elektroreológikus folyadékokkal töltött lengéscsillapítókkal is, amelyekkel a megfelelő csillapítás valós idejű szabályzással érhető el. A magas költségek és a szerkezet bonyolultsága miatt viszont egyre nagyobb figyelem irányul a passzív megoldásokra is.

A szerzők előző munkájuk [4-5] során fejlesztettek egy analitikus módszert, amellyel tetszőleges nemnewtoni folyadék esetén számítható a lengéscsillapító csillapítási karakterisztikája. A harmadik fejezetben ezen módszer alkalmazásával meghatározzuk az adott geometriájú lengéscsillapítók csillapítási karakterisztikáját három különböző folyadék esetén. Az így kapott nemlineáris csillapítást behelyettesítjük az egyszabadságfokú rezgőrendszert leíró egyenletekbe és meghatározzuk a rezonanciagörbét.



1. ábra. Az egyszabadságfokú rezgőrendszer sematikus ábrája az alkalmazott jelölésekkel



2. ábra. Az egyes lengéscsillapítókban alkalmazott folyadék reológiák (felső) és a hozzájuk tartozó csillapítási karakterisztikák (alsó)

2. MATEMATIKAI MODELL

A vizsgált egyszerűsített egy szabadságfokú rezgőrendszer sematikus ábrája az 1. ábrán látható. Az $m=100\text{kg}$ tömeget egy harmonikus $u(t) = A\sin(\omega t)$ útgerjesztés gerjeszti, ahol $A = 3\text{mm}$ a gerjesztés amplitúdója, és ω a gerjesztés körfrekvenciája. A rezgést az $s = 100\text{N/m}$ rugómerevségű rugó és az ábrán látható lengéscsillapító csillapítja. A lengéscsillapító egy D névleges belső átmérőjű hengerből és egy ugyanakkora D névleges külső átmérőjű dugattyúból áll, amely a d átmérőjű rúddal kapcsolódik a tömeghez. A dugattyún egy R sugarú L hosszúságú furat biztosítja a folyadék áramlását a dugattyú két oldalán. A folyamat során a furaton keresztül történő áramlás során fellépő viszkozus erők csillapítják a rezgést. Az egyes változatok méreteit az 1. táblázat foglalja össze. A rendszert leíró mozgásegyenletet az $y(t) = x(t) - u(t)$ gerjesztéshez viszonyított relatív elmozdulás segítségével írtuk fel az

$$m\ddot{y} + sy(t) + F_d(v) = -m\ddot{u}(t) \quad (1)$$

alakban, ahol $F_d(v)$ a lengéscsillapító sebességtől függő csillapítási ereje. Ezen függvény meghatározásához alkalmazzuk a [5] cikkben leírt módszert a következő fejezetben.

Az (1) egyenletet különböző ω körfrekvencia mellett oldottuk meg a *Matlab ode45* beépített függvénye segítségével. A megoldások alapján két átviteli függvényt vizsgáltuk: 1) az $Y(\omega)$ abszolút elmozdulás átviteli függvényt

$$Y(\omega) = 20\log_{10}\left(\frac{X}{A}\right) \text{ [dB]}, \quad (2)$$

ahol X a partikuláris megoldás amplitúdója és 2) az $Y_E(\omega)$ energia átviteli függvényt

$$Y_E(\omega) = 20\log_{10}\left(\frac{\int_0^T (x_p(t))^2 dt}{\int_0^T (A\sin(\omega t))^2 dt}\right) \text{ [dB]}, \quad (3)$$

ahol $x_p(t)$ a partikuláris megoldás. Az így kapott átviteli függvények láthatók a 3. ábrán.

3. CSILLAPÍTÁSI ERŐ SZÁMÍTÁSA

Lamináris csőáramlás $Q(\Delta p)$ térfogatáram (nyomáskülönbség) jelleggörbéjének meghatározására [5] ad általánosan tetszőleges reológiára használható formulát:

$$Q = \frac{2\pi R^3}{\left(\frac{\Delta p R}{2L}\right)^3} \left[0,5 \left(\frac{\Delta p R}{2L}\right)^2 F\left(\frac{\Delta p R}{2L}\right) - S\left(\frac{\Delta p R}{2L}\right) \right]. \quad (4)$$

A fenti képletben a L a furat hossza és R a furat sugara. A folyadék reológiáját az $\dot{\gamma} = f(\tau)$ nyírási sebesség (nyírófeszültség) inverz reológiai görbével vesszük figyelembe. Például, hatványfüggvény folyadék esetén (ahol a $\tau = K\dot{\gamma}^n$, a nyírófeszültség a nyírósebesség n -edik hatványával arányos, és az arányossági tényező pedig a K konzisztencia index) $\dot{\gamma} = f(\tau) = (\tau/K)^{1/n}$. A (4) egyenletben az $F(\tau)$ és $S(\tau)$ függvények az $f(\tau)$ inverz reológiai görbék megfelelő integrálfüggvényei:

$$F(\tau) = \int_0^\tau f(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau} \text{ és } S(\tau) = \int_0^\tau \tilde{\tau} F(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau}. \quad (5)$$

A módszer jól szemléltethető a hatványfüggvény folyadékokra, hiszen ekkor

$$F(\tau) = \frac{\tau(\tau/K)^{1/n}}{\frac{1}{n}+1}, S(\tau) = \frac{n\tau^3(\tau/K)^{1/n}}{(\frac{1}{n}+3)(n+1)}, \text{ tehát } Q = \frac{2\pi R^3 N}{3n+1} \left(\frac{\Delta p R}{2LK}\right)^{1/n}, \quad (6)$$





ami megegyezik a szakkönyvekben [1] található képlettel.

A (4)-(5) egyenletekkel meghatározott $Q(\Delta p)$ kapcsolatból meghatározható az $F_d(v)$ csillapítási erő(sebesség) kapcsolat a

$$v = QA \text{ és } F_d = \Delta p A, A = \frac{D^2 - d^2}{4} \pi \quad (7)$$

azonosságok segítségével, ahol $A = (D^2 - d^2)\pi/4$ a dugattyú felülete. A (4)-(6) egyenleteket a 2.a ábrán látható reológiákra oldottuk meg, így a 2.b ábrán látható csillapítási karakterisztikákat kaptuk. Az egyes folyadékok reológiai méréseinek forrásai az 1. táblázatban találhatóak meg, míg a mért reológiák és a kapott csillapítási karakterisztikákat a 2.a és 2.b diagrammok mutatják. Az ábrák alapján jól látható, hogy newtoni folyadék esetén lineáris (folytonos vonal), nyírásra lágyuló folyadék esetén degresszív (szaggatott és pontozott vonal), míg nyírásra keményedő folyadék esetén progresszív (pontvonal) csillapítási karakterisztika érhető el.

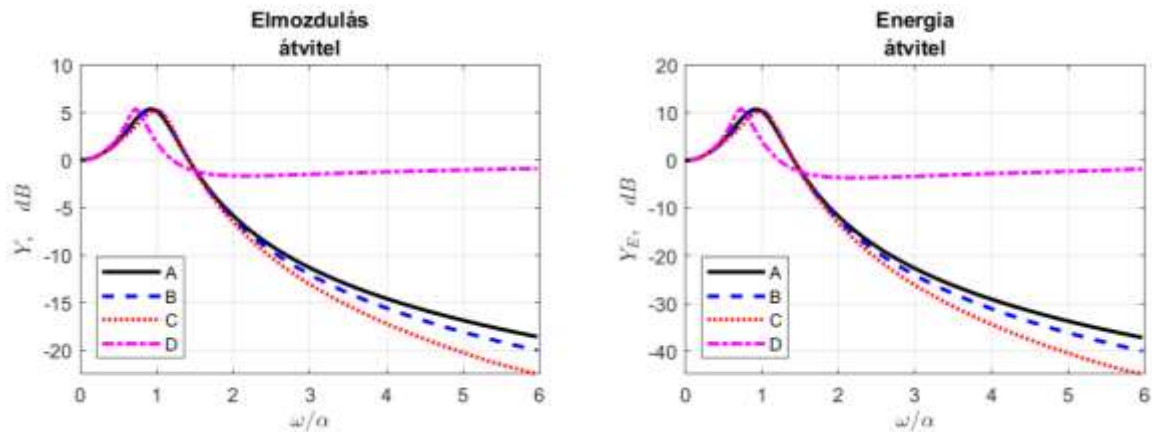
1. táblázat: Az alkalmazott lengéscsillapítók adatai

Lengéscsillapító	A	B	C	D
Jelölés				
Folyadék [forrás]	Shell Risella X 420 motorolaj [6]	Shell Helix Ultra Prof. AJ-L 0W-30 motorolaj [6]	Wacker AK 60000 szilikon olaj [7]	PEG200+SiO ₂ szuszpenzió [2]
Reológia	newtoni	nyírásra lágyuló	nyírásra lágyuló	nyírásra keményedő
Furat sugár, R	1,6 mm	1,6 mm	1,6 mm	1,6 mm
Furat hossz, L	15,8 mm	8,3 mm	7,4 mm	21,7 mm
Dugattyú átmérő, D	77,6 mm	583 mm	302 mm	194 mm

4. REZONANCIAGÖRBÉK

Az (1)-(6) egyenleteket $\omega \in [0,200] \text{ rad/s}$ körfrekvencia tartományon oldottuk meg három különböző reológia esetén. A lengéscsillapítók D, R, L méreteit úgy állítottuk be, hogy a rezonanciacsúcs minden esetben azonos legyen a könnyebb összehasonlíthatóság végett. Az így kapott rezonanciagörbék láthatók a 3. ábrán. Megfigyelhető, hogy nyírásra lágyuló folyadék alkalmazásával a rezonanciacsúcs kis mértékben jobbra tolódik a newtoni esethez, tehát a lineáris csillapításhoz képest, míg a magasabb frekvenciájú csillapítás javul. Ez a tapasztalat egybevág más szerzők kísérleti vizsgálataival is [3]. Szilikon olaj alkalmazásával a rezonanciacsúcs jobbratolódása jelentősebb, és a magasabb frekvenciájú csillapítás is tovább javul. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy a szilikon olaj viszkozitáscsökkenése jelentősebb.

A nyírásra keményedő folyadék alapú lengéscsillapítót vizsgálva azt tapasztalhatjuk, hogy a rezonanciacsúcs balra tolódik, míg a magasabb frekvenciájú csillapítás romlik. Ez azzal magyarázható, hogy nagy frekvenciák esetén az $A\omega$ nagyságú sebességamplitúdó is nő, amihez a lineárishoz képest nagyobb erő tartozik. A folyadék felkeményedik, így a lengéscsillapító közel merevtest-szerűen mozog, és a rezgés amplitúdója csillapítás nélkül adódik át. A lengéscsillapító elmozdulás és energiaátvittele így hasonló kis és nagy frekvenciák esetén is.



3. ábra. Az egyes lengéscsillapítókkal kapott rezonanciagörbék

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásaink során különböző reológiájú (newtoni, nyírásra lágyuló, nyírásra keményedő) folyadékokkal töltött lengéscsillapítók rezonancia görbéit vizsgáltuk numerikusan. Az eredmények alapján azt tapasztaltuk, hogy nyírásra lágyuló folyadékokkal (pl. motor olaj, szilikon olaj) a rezonanciacsúcs magasabb frekvencia felé tolható, illetve a lengéscsillapító magas frekvenciák esetén jelentősen jobban csillapít, mint a hagyományos newtoni folyadékkal (pl. hidraulika olaj) töltött lengéscsillapító. Nyírásra keményedő folyadék esetén az amplitúdó és energiaátvitel közel megegyezett a kisfrekvenciájú értékekkel, így nyírásra keményedő folyadékkal közel állandó, frekvenciafüggetlen viselkedés valósítható meg.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Gépészmérnök-képzésért Alapítvány és a Progression Alapítvány pályázata támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] R.P. Chhabra, J. F. Richardson. *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2011.
- [2] Hasanzadeh, M., Mottaghitalab, V., Rezaei, M. *Rheological and viscoelastic behavior of concentrated colloidal suspensions of silica nanoparticles: A response surface methodology approach*. *Advanced Powder Technology*. 2015, 26(6), 1570-1577.
- [3] Ho, C. és társai: *Vibration isolation using nonlinear damping implemented by a feedback-controlled MR damper*. *Smart Materials and Structures*. 2013, 22(10), 105010.
- [4] Nagy-György P., Hős Cs. *A Graphical Technique for Solving the Couette-Poiseuille Problem for Generalized Newtonian Fluids*. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2019, 63(1), 200-209.
- [5] Nagy-György P., Hős Cs. *Predicting the characteristics of vibration dampers employing generalized shear thickening fluids*. *Journal of Sound and Vibration*. 2021, (bírálat alatt)
- [6] Yu, M., Zhang, J., Joedicke, A., & Reddyhoff, T. *Experimental investigation into the effects of diesel dilution on engine lubrication*. *Tribology International*. 2021, 156, 106828.
- [7] Wacker Chemie AG.: *Wacker Silicone Fluids AK*, 2009., https://www.behlke.com/520pdf/wacker_silicone_oil.pdf (Utolsó letöltés: 2020. 02.03).