

NEIGIAMOJO STANDUMO VIBROIZOLIACINIO STALIUKO „MINUS K 500BM-1“
TYRIMASVitalija Meškelytė¹, Mindaugas Jurevičius², Michail Berba³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹vmeskelyte@gmail.com; ²mindaugas.jurevicius@vgtu.lt; ³mgkat@vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjamas neigiamą standumo (angl. *negative-stiffness*) vibroizoliacinio staliuko „Minus K 500BM-1“ efektyvumas 2–110 Hz diapazone. Apžvelgti kiti galimi vibroizoliacijos būdai. Atlikti eksperimentiniai vibracijų perduodamumo tyrimai. Išbandyta speciali vibracijų žadinimo įranga, leidžianti atlikti numatytus bandomojo objekto tyrimus. Aprašyta eksperimentinių tyrimų metodika. Pateikti eksperimentų metu gauti rezultatai ir išvados.

Reikšminiai žodžiai: neigiamasis standumas, naudingoji apkrova, HVAC sistemos, solenoidai, elastomerai.

Įvadas

Pastatai virpa ir svyruoja po mūsų kojomis, tačiau daugelis net nepastebi šių žemųjų dažnių vibracijų (Ogando 2007). Vėjas ar netoli esančios šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo angos (angl. HVAC) sukelia žemųjų dažnių vibracijas, kurios gali iškreipti jautrią įrangą atliekamų bandymų ir matavimų duomenis. Ši vibracijų problema aktualiausia dirbant atominiu lygiu ir nanolygiu.

Net ikigarsinis foninis bangų daužymosi į krantus rezonansas gali būti pernelyg triukšmingas kai kurioms bandymų sąlygoms.

Matavimo įranga nuo pašalinės vibracijos gali būti izoliuota naudojant aktyviąją arba pasyviąją vibroizoliacijas. Aktyviaisiais metodais pasitelkus elektroniką, naudojant jutiklius ir solenoidus, sukuriama lygios, bet priešingos krypties jėgos nepageidaujama vibracijai slopinti ir izoliuoti. Pasyviaisiais metodais vibracija izoliuojama naudojant mechaninį ryšį, kuris vibracijos energiją išsklaido arba nukreipia kita kryptimi anksčiau, negu ji pasiekia izoliuojamąjį objektą. Pasyviosioms sistemoms galima naudoti elastomeras, spyruokles, skysčius arba neigiamą standumo elementus.

Vienas iš pagrindinių pasyviųjų vibracijos izoliatorių yra spyruoklė, įtaisyta tarp perduodančio smūgį arba vibraciją paviršiaus ir izoliuojamojo objekto. Spyruoklė priešinasi impulsui ir deformuodamasi sugeria nemažai energijos. Skystis arba elastiniai elementai pridedami prie spyruoklės tam, kad atliktų slopinimo funkciją. Paprasčiausias pavyzdys yra automobilio amortizatorius. Šiuo atveju mechaninė smūgio arba vibracijos energija veikia skystyje, kuriame ji

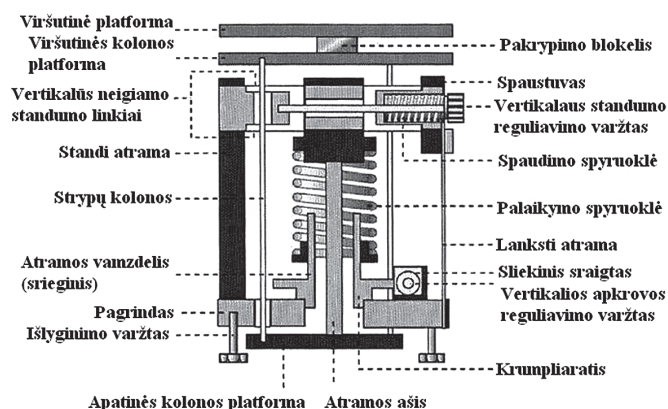
paverčiama šilumine energija, taip sumažinamas automobilio kėbului perduodamas energijos kiekis. Pasyviosios vibroizoliacinės sistemos paprastai kainuoja mažiau negu aktyviosios ir dėl santykinio paprastumo yra patikimesnės ir saugesnės.

Pasyviosioms vibroizoliacinėms sistemoms priskiriamos neigiamą standumo vibroizoliacinės sistemos, kuriomis galima izoliuoti vibracijų poveikį visų šešių laisvės laipsnių kryptimis, kai rezonansinis dažnis yra 0,5 Hz ar net žemesnis. Naudojant šias sistemas vibroizoliacija būna 50–100 kartų geresnė negu daugumos pneumatinių staliukų 5–10 Hz diapazone. Atsižvelgiant į vibracijos pobūdį, kartu gali būti panaudotos kelios vibroizoliacinės sistemos, veikiančios kaip viena.

Tyrimo objektas

Tirtas neigiamą standumo vibroizoliacinis staliukas „Minus K 500BM-1“ (1 pav.), kuris izoliuoja žemųjų dažnių ir amplitudžių grindų ir pastatų vibracijas. Šis vibroizoliatorius yra mechaninis, izoliacija užtikrinama naudojant spyruokles ir neigiamą standumo mechanizmą.

M. Hosoda (2009) nustatė, kad ypač svarbi sąlyga yra ta, kad periodinės jėgos dažnis beveik arba tiksliai atitiktų savąjį įrangos dažnį f_0 . Sirtyje apie f_0 perduodamumas yra didesnis nei 1. Jis reiškia matavimo įrangai perduodamą padidintą pagrindo judesių vibraciją. Jei perduodamumas yra mažesnis nei 1, įranga laikoma izoliuota nuo pagrindo virpesių. Savojo dažnio f_0 išraiška pateikiama formule:



1 pav. Neigiamojo standumo vibroizoliacinio staliuko „Minus K 500BM-1“ mechanizmas, kuriuo mažinamas pasyvosios vibroizoliacinės sistemos savasis dažnis

Fig. 1. Negative-stiffness vibration isolation mechanism “Minus K 500BM-1” used for reducing natural frequency in the passive system

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (1)$$

Pagal šią formulę savasis dažnis gali būti labai mažas, jeigu įrangos konstrukcija bus itin nestandi ir labai sunki. Tačiau tai nėra geriausia išeitis. Užtuot keitus įrangos konstrukciją, savasis dažnis taip pat gali būti mažinamas naudojant vibroizoliacinę sistemą, kuri turi filtruoti grindų (pamato) vibracijas, dar nepasiekusias stalo paviršiaus.

Izoliacija pirmiausia pasiekama išlaikant reikiamą santykį tarp trikdymo dažnio ir sistemos savojo dažnio. Nuslopintas sistemos savasis dažnis išreiškiamas formule:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M} - \left(1 - \left(\frac{C}{C_c}\right)^2\right)}, \quad (2)$$

čia C – slopinimo koeficientas su matavimo vienetais [Kg-sec/m]; C_c – kritinis slopinimas [Kg-sec/m]; C/C_c – bematis santykinis slopinimo rodiklis.

Slopinimas yra naudingas, kai įrengta vibroizoliacinė sistema veikia arti savojo dažnio. Taip sumažinamas perduodamumas. C/C_c slopinimo koeficiento didinimas mažina izoliacinės sistemos savąjį dažnį.

Perduodamumas išreiškiamas formule:

$$T = \frac{|y|}{|x|} \quad (3)$$

Perduodamumą taip pat galima išreikšti decibelais (dB):

$$T = 20 \log \frac{|y|}{|x|} \text{ dB} \quad (4)$$

Tyrimo metodika ir eksperimentiniai tyrimai

Neigiamojo standumo vibroizoliacinė sistema „Minus K 500BM-1“ vibracijų perduodamumo ir kitų dinaminųjų parametrų tyrimai atlikti naudojant minimalią 164 kg išskirtąją apkrovą ir korinės konstrukcijos plokštę.

Eksperimentų metu buvo nustatytos:

- vibracijų perdavimo charakteristikos esant impulsiniam žadinimui;
- vibracijų perdavimo vertikalioji kryptimi charakteristikos žadinant 2–110 Hz dažniais;
- slopinimo efektyvumas esant žemiesiems dažniams.

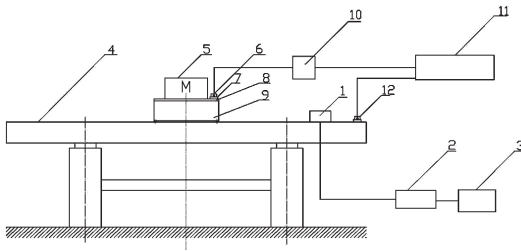
Bandydams ir tyrimams naudota Danijos firmos „Brüel & Kjær“ vibracijų bei kitų dinaminųjų charakteristikų matavimo ir analizės aparatai:

- kilnojamoji matavimo rezultatų apdorojimo įranga „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727“ su kompiuteriu DELL;
- vibrometras, modelis 2511;
- seisminis akcelerometras, modelis 8306;
- seisminis akcelerometras, modelis 8318;
- orientavimo plokštelė;
- stiprintuvas, modelis 2706;
- virpesių generatorius, modelis 1027;
- vibratorius, modelis 4810;
- žadinimo plaktukas, modelis 8202.

Matavimo signalai apdoroti pasitelkus „Origin 6“ programinį paketą. Apskaičiuoti signalų spektrai ir statistiniai parametrai.

Virpesiai matuoti ant neigiamojo standumo vibroizoliacinio staliuko paviršiaus pritvirtintos orientavimo plokštelės su seisiniu akcelerometru 8306. Neigiamojo standumo vibroizoliacinis staliukas sumontuotas ant standaus optinio stalo. Orientavimo plokštelė leidžia pritvirtinti ar perstatyti akcelerometrą reikiama kryptimi. Eksperimentinio stendo schema pateikta 2 pav.

Pirmuoju atveju vibratoriumi buvo sukurti 2–110 Hz harmoniniai virpesiai vertikalioji kryptimi (3–7 pav.). Antruoju atveju jie buvo žadinami smūginiais impulsiniais dinamometriniais plaktukais vertikalioji kryptimi (8, 9 pav.).



2 pav. Virpesių žadinimas naudojant vibratorių: 1 – vibratorius 4810; 2 – stiprintuvas 2706; 3 – virpesių generatorius 1027; 4 – korinės konstrukcijos optinis stalo; 5 – masė 164 kg; 6 – „Seisminis akcelerometras 8306“; 7 – orientavimo plokštelė; 8 – tvirtinimo plokštė; 9 – neigiamojo standumo vibroizoliacinė sistema; 10 – vibrometras 2511; 11 – kilnojamoji matavimo rezultatų apdorojimo įranga; 12 – seisminis akcelerometras

Fig. 2. Oscillation caused by a vibrator: 1 – oscillator 4810; 2 – amplifier 2706; 3 – generator 1027; 4 – optical table; 5 – mass 164 kg; 6 – seismic accelerometer 8306; 7 – orientation log; 8 – fix board; 9 – negative-stiffness vibroisolating table; 10 – vibrometer 2511; 11 – movable measuring equipment; 12 – seismic accelerometer

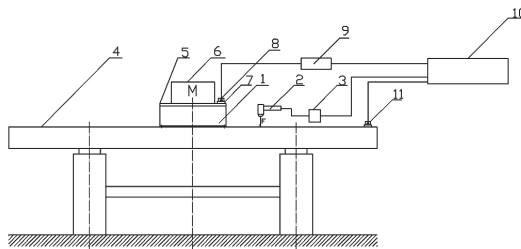
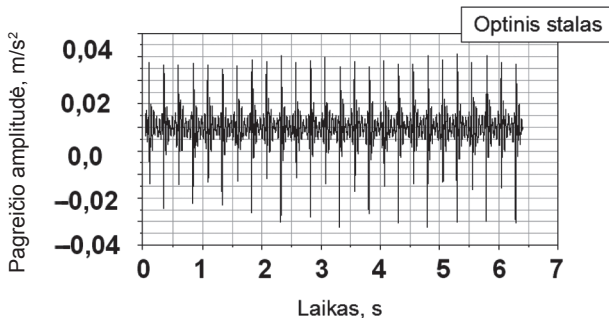


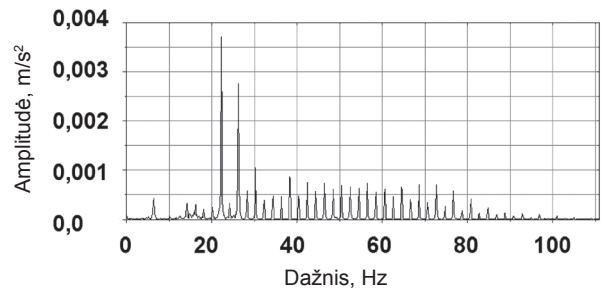
Fig. 3. Oscillation caused by a dynamometer hammer: 1 – negative-stiffness vibroisolating table; 2 – shock hammer 8202; 3 – amplifier 2706; 4 – optical table; 5 – fix board; 6 – mass – 164 kg; 7 – orientation log; 8 – seismic accelerometer 8306; 9 – vibrometer 2511; 10 – movable measuring equipment; 11 – seismic accelerometer 8318

3 pav. Virpesių žadinimas naudojant dinamometrinių plaktuką: 1 – neigiamojo standumo vibroizoliacinė sistema; 2 – smūginis plaktukas 8202; 3 – stiprintuvas 2706; 4 – korinės konstrukcijos stalo; 5 – tvirtinimo plokštė; 6 – masė – 164 kg; 7 – orientavimo plokštelė; 8 – seisminis akcelerometras 8306; 9 – vibrometras 2511; 10 – kilnojamoji matavimo rezultatų apdorojimo įranga; 11 – seisminis akcelerometras 8318



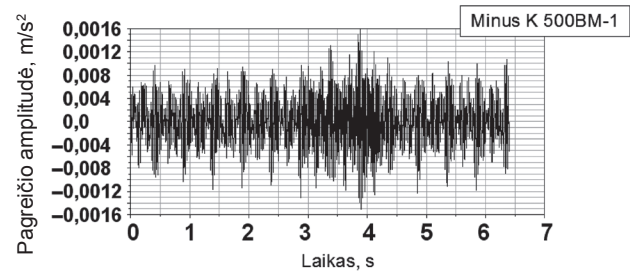
4 pav. Laikinis signalas. Žadinama virpesiais ant optinio stalo, dažnis 2 Hz, vertikaliaji kryptis

Fig. 4. Temporal signal. Vertical excitation vibration with a frequency of 2 Hz on the optical table



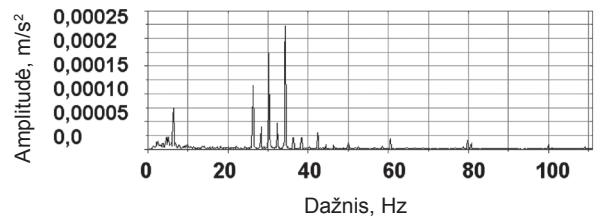
5 pav. Signalų spektras. Žadinama virpesiais ant optinio stalo, dažnis 2 Hz, vertikaliaji kryptis

Fig. 5. Signal spectrum. Vertical excitation vibration with a frequency of 2 Hz on the optical table



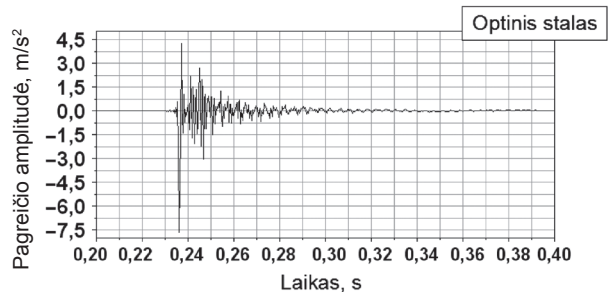
6 pav. Laikinis signalas. Slopinimo virpesiai ant „Minus K 500BM-1“ staliuko, kai žadinama 2 Hz vertikaliąja kryptimi

Fig. 6. Temporal signal. Vertical inhibition vibration with a frequency of 2 Hz on the “Minus K 500BM-1” table



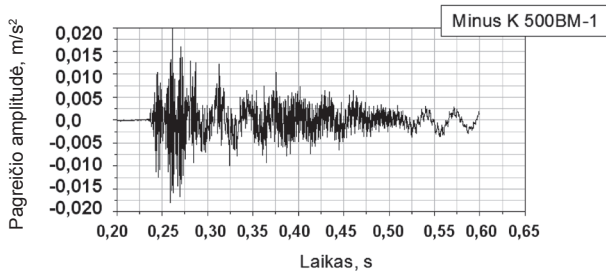
7 pav. Signalų spektras. Slopinimo virpesiai ant „Minus K 500BM-1“ staliuko, kai žadinama 2 Hz vertikaliąja kryptimi

Fig. 7. Signal spectrum. Vertical inhibition vibration with a frequency of 2 Hz on the “Minus K 500BM-1” table



8 pav. Išplėstas impulsinis žadinimo signalas

Fig. 8. Extended impulse excitation signal



9 pav. Išplėstas nuslopintas signalas ant „Minus K 500BM-1“ staliuko sužadintus impulsiniu signalu

Fig. 9. Extended inhibited signal on the “Minus K 500BM-1” table

Tyrimų rezultatai

1 lentelė. Harmoninių virpesių statistiniai vibracijos pagreičio matavimo signalų parametrai žadinant harmoniniais virpesiais

Table 1. Statistical parameters for measuring vibration acceleration in harmonic oscillation using the excitation signal

Akcelerometras	Žadinimo jėga, Hz	Standartinis nuokrypis S_x , m/s ²	Standartinis vidurkio nuokrypis S_x , m/s ²	Minimali reikšmė x_{min} , m/s ²	Maksimali reikšmė x_{max} , m/s ²
8306	2	3,983E-4	3,11145E-6	-0,00151	0,0016
8318	2	0,00654	5,11019E-5	-0,04248	0,0313
8306	5	0,00149	1,165E-5	-0,0028	0,00313
8318	5	0,02683	2,09595E-4	-0,1395	0,15034
8306	20	0,00338	2,63986E-5	-0,01192	0,00976
8318	20	0,37223	0,00291	-1,1837	1,06612
8306	50	0,014	1,09401E-4	-0,03719	0,04292
8318	50	1,61519	0,01262	-4,09012	3,81621
8306	80	0,00453	3,5372E-5	-0,00941	0,01134
8318	80	0,37948	0,00296	-1,00226	0,79873

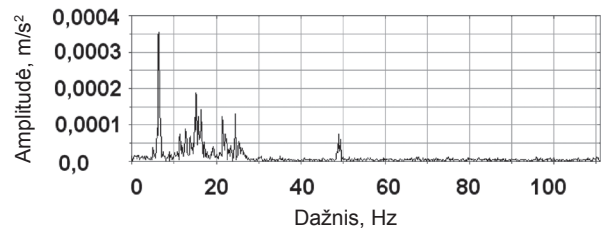
Impulsinis žadinimas:

Remiantis tyrimų rezultatais (10–13 pav. 1 lentelė) ir palyginus juos su „Minus K Technology“ pateikta vibroizoliacinio staliuko „Minus K“ vibracijų slopinimo kreive (14 pav.), matomas slopinimo skirtumas, pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Slopinimo kreivių palyginimo rezultatai

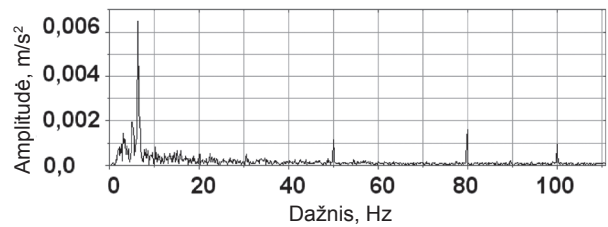
Table 2. The results and comparisons of inhibition curves

Dažnis, Hz	Slopinimas, dB (VG TU)	Paklaida ($\pm 3\sigma$)	Slopinimas, dB (Minus K Technology)
7	-16,72	4,94208	-42
10	-24,87	12,80466	-48
20	-38,24	18,90421	-52
30	-23,86	21,30425	-56
50	-45,11	40,00912	-55
80	-38,58	39,53971	-49



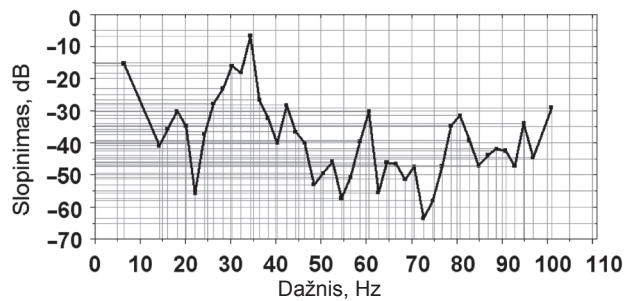
10 pav. Vibracijų fono signalo spektras. Seisminis akcelerometras 8318 ant optinio stalo

Fig. 10. Ground vibration spectrum on the optical table. Seismic accelerometer 8318



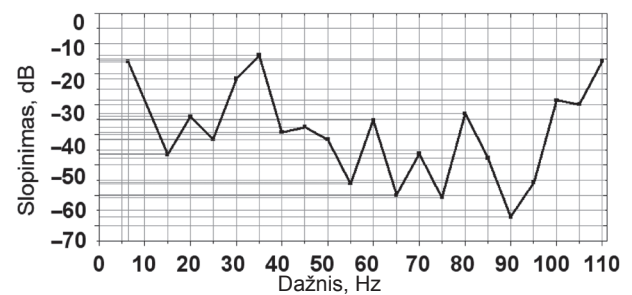
11 pav. Vibracijų fono signalo spektras. Seisminis akcelerometras 8306 ant „Minus K 500BM-1“ staliuko

Fig. 11. Ground vibration spectrum on the “Minus K 500BM-1” table. Seismic accelerometer 8306



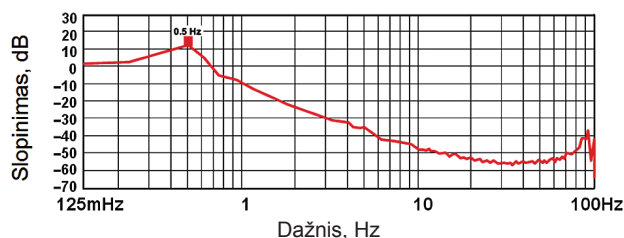
12 pav. Vibroizoliacinio staliuko „Minus K 500BM-1“ vibracijų slopinimo kreivė žadinant 2 Hz

Fig. 12. Transmissibility curve of the “Minus K 500BM-1” table. Excitation vibration with a frequency of 2 Hz



13 pav. Vibroizoliacinio staliuko „Minus K 500BM-1“ vibracijų slopinimo kreivė žadinant 5 Hz

Fig. 13. Transmissibility curve of the “Minus K 500BM-1” table. Excitation vibration with a frequency of 5 Hz



14 pav. „Minus K Technology“ gauta vibracijų slopinimo kreivė
Fig. 14. The transmissibility curve obtained applying “Minus K Technology”

Išvados

1. Sukurta metodika ir įranga vibraciniam staliukui tirti. Atlikti neigiamojo standumo vibroizoliacinio staliuko „Minus K 500BM-1“ tyrimai. Pateikti žadinimo ir slopinimo signalai ir jų spektrai.
2. Nustatytos neigiamojo standumo vibroizoliacinio staliuko „Minus K 500BM-1“ vibracijų perduodamumo vertikaliąja kryptimi charakteristikos 2–110 Hz dažnių diapazone.
3. Vibroizoliacinio staliuko „Minus K 500BM-1“ slopinimas, nustatytas eksperimentais, skiriasi 19,1 dB lyginant su firmos „Minus K Technology“ pateiktais duomenimis. Iš visų eksperimento duomenų matyti ryškus slopinimo sumažėjimas, kai dažnis yra 30 Hz. Šio reiškinio priežastis reikėtų aiškintis ateityje.

Literatūra

- Colla, L. E. 2003. *Piezoelectric Technology for Active Vibration Control*.
- Ogando, J. 2007. Buildings really do shake and sway under our feet, *Design News*, 2007-01-25.
- Hosoda, M. 2009. *Selection of Vibration Isolators*.

INVESTIGATION INTO NEGATIVE-STIFFNESS VIBROISOLATION TABLE “MINUS K 500BM-1”

V. Meškelytė, M. Jurevičius, M. Berba

Abstract

The article analyzes the performance of a negative-stiffness vibroisolating table in the range of a frequency of 2–110 Hz and reviews other possible ways of vibroisolating. The paper deals with conducted experimental tests on the transmissibility of vibrations employing specific tested equipment for vibration excitation enabling to execute research facilities. The article also describes the methodology of experimental tests and presents the obtained results and conclusions of experimental analysis.

Keywords: negative-stiffness, payload, HVAC systems, actuators, elastomers.