

## DINAMINIO PROCESO PERDAVIMO SPYRUOKLE TYRIMAS

Vytautas Bučinskas<sup>1</sup>, Jevgenij Dmitrijev<sup>2</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>vytautas.bucinskas@vgtu.lt; <sup>2</sup>mgkat@vgtu.lt

**Santrauka.** Straipsnyje nagrinėjami dinaminio proceso perdavimo spyruokle ypatumai bei galimybės ir kaip tai panaudoti spyruoklėmis vibroizoliuotų atramų diagnostikai. Buvo sukurta tyrimo metodika ir atitinkamas matavimo stendas spyruoklės įėjimo ir išėjimo charakteristikoms gauti. Naudojant impulsinio tipo signalą, gautas sistemos savųjų virpesių spektras, taip pat sistema žadinta vibratoriumi, siekiant iširti ir įvertinti spyruoklės perdavimo funkciją esant nerezonansiniams dažniams. Analizuojant išmatuotas realizacijas, išvesta perdavimo funkcija.

**Reikšminiai žodžiai:** perdavimo funkcija, slopinimo koeficientas, spyruoklė, diagnostika, dažninė charakteristika.

### Įvadas

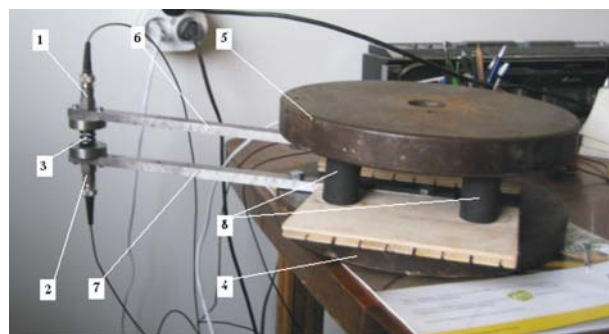
Šiuolaikinė technika tampa vis sudėtingesnė, o jos diagnostikai keliami vis griežtesni reikalavimai. Pastaruoju metu plinta neardomojo metodo diagnostika. Pasitelkiant tokią objekto analizę įmanoma nustatyti daugelį įrangos defektų neardant paties įrenginio. Jos pranašumas tas, kad neardomojo metodo diagnostika leidžia išvengti įrangos stabdymo gamybos procese. Tai ypač svarbu rotorinėms sistemoms, pvz., guolių diagnostikai pieno separatoriuose. Jų konstrukcijoje numatyti vibroizoliuoti guoliai, sumontuoti tamprioje atramoje, naudojant spyruokles su tampriais elementais. Vienas spyruoklės galas remiasi į guolio išorinio žiedo korpusą, kitas – į išorinį korpusą. Taigi spyruoklė yra tamprios atramos elementas, atskiriantis rotoriaus ir guolių sistemas nuo korpuso. Tai padaryta siekiant mažinti sistemos vibracijų perdavimą į korpusą. Atliekant tokių guolių diagnostikos kaip neardomo objekto matavimus įprastas guolių pažeidimų perdavimas į korpusą iškreipiamas dėl tamprių elementų poveikio.

Šio darbo tikslas – tirti dinaminio proceso perdavimą tampriomis atramomis, nustatant įėjimo ir išėjimo signalus ir juos apdorojant pasirinkta metodika.

### Eksperimentinė įranga

Siekiant iširti dinaminio proceso perdavimą tampriomis atramomis, buvo sukonstruotas eksperimentinis stendas (1 pav.).

Matavimo stendas sudarytas iš dviejų strypų, vienas jų atlieka vibroizoliuoto guolio korpuso funkciją, o kitas imituoja sistemos korpusą.



1 pav. Matavimo stendas žadinant impulsiniu smūgiu:

1 – įėjimo signalo jutiklis; 2 – išėjimo signalo jutiklis; 3 – spyruoklė; 4 – apatinė plokštė; 5 – viršutinė plokštė; 6 – vibroizoliuoto guolio išorinį žiedą imituojantis strypas; 7 – sistemos korpusą imituojantis strypas; 8 – guminis slopin tuvas

Fig. 1. Measurement workbench for impact exciting:

1 – input signal sensor; 2 – output signal sensor; 3 – spring; 4 – lower plate; 5 – upper plate; 6 – bar replacing vibro-isolated outer bearing ring; 7 – bar replacing system frame; 8 – rubber dumper

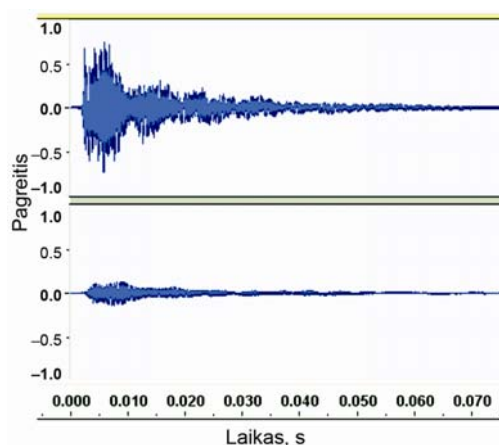
Tarp jų yra tiriamasis objektas – spyruoklė. Kiekvienas keturkampio profilio formos strypas standžiai pritvirtintas prie masyviosios plokštės. Viršutinė plokštė izoliuota nuo apatinės guminiiais slopintuvais. Didelė plokščių masė užtikrina geresnės kokybės įėjimo ir išėjimo signalus.

Eksperimento metu matavimams naudoti pjezoakcelerometrai. Jutikliai sumontuoti prie viršutinio ir apatinio spyruoklės galų. Signalai iš jutiklių siunčiami į kompiuterinės garso plokštės linijinį įėjimą. Guoliuose dėl rutuliukų pažeidimų, vidinio ar išorinio žiedų ištrupėjimo dėl nuovargio atsiranda impulso tipo smūgių. Tokie smūgiai sukelia visos sistemos savuosius virpesius. Viršutinei

plokštei suduodant impulsinį smūgį ir spyruoklės įėjime bei išėjime matuojant virpesius jutikliais, galima įvertinti išėjimo ir įėjimo signalų amplitudžių santykį.

### Tyrimo procesas

Pirmajame tyrimo proceso etape sistemoje buvo sukelti savieji virpesiai impulsiniu smūgiu. Tai buvo atliekama į viršutinę stendo plokštę suduodant trumpą smūgį plaktuku. Įėjimo ir išėjimo jutikliais išmatuoti vibracijų pagreičio signalai parodyti 2 paveiksle.



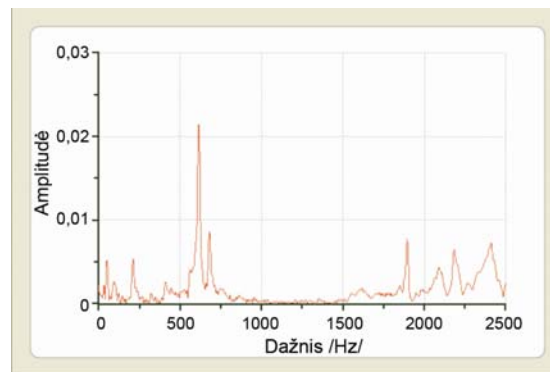
**2 pav.** Spyruoklės įėjimo (viršutinis) ir išėjimo (apatinis) signalų grafikai

**Fig. 2.** Input (upper) and output (lower) spring acceleration signal graphs

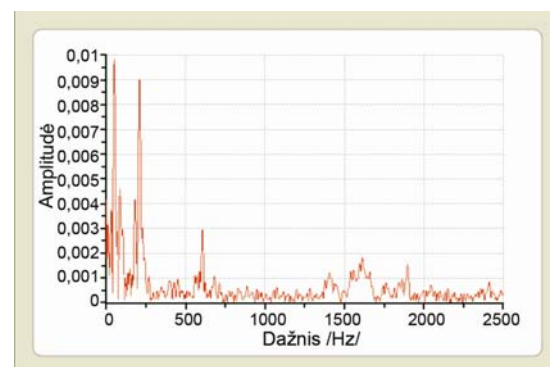
Iš grafikų galima matyti, kad įėjimo ir išėjimo signalų lygiai skiriasi apie 10–15 kartų.

Iš jutiklių gautas analoginis signalas buvo siunčiamas į kompiuterį, paverčiamas skaitmenine forma ir apdorojamas specialiu programinės įrangos paketu „Prakalbinkime kompiuteri“. Visų pirma nufiltruojamos daugiau nei 5000 Hz dedamosios, nes jos gali būti iškreiptos dėl pjezoelektrinių jutiklių dinaminių charakteristikų. Nufiltruoti abu signalai, esantys vienoje rinkmenoje, atskiriami į dvi atskiras rinkmenas. Atskyrus kanalus suvienodinamas signalų mastelis. Vėliau signalai du kartus integruojami. Kadangi integravimo procedūra netobula ir papildomai atsiranda daugiau kaip 5000 Hz dažniai, filtruojama dar kartą. Galutinis nufiltruotas signalas apdorojamas programa „Prakalbinkime kompiuteri“. Taip gaunami įėjimo ir išėjimo signalų amplitudinių dažninių charakteristikų grafikai (3 pav.).

Iš gautų grafikų aiškiai matyti, kad išėjimo signalas atkartoja įėjimo signalą. Sudarytam stendui būdingi keli savieji virpesiai, kuriems esant sistema turi reikšmingas amplitudes.



a)



b)

**3 pav.** Įėjimo (a) ir išėjimo (b) signalų amplitudinės dažninės charakteristikos

**Fig. 3.** Input (a) and output (b) signal amplitude-frequency characteristics

Analizuojant grafiką, galima daryti išvadą, kad spyruoklės perdavimo koeficientas priklauso nuo žadinimo signalo dažnio. Žvelgiant į 0–2500 Hz dažnių juostą galima matyti, kad 250–2500 Hz išėjimo signalas yra apytiksliai 10 kartų mažesnis už įėjimo signalą. Esant žemesiems dažniams 0–250 Hz, išėjimo signalas turi apie du kartus didesnę amplitudę už įėjimo signalą. Manoma, kad taip nutinka dėl apatinės stendo dalies rezonanso.

Žinoma, kad pažeisti guoliai sukelia vibraciją tam tikrose dažnių juostose. Nagrinėjamam rotoriniam pieno separatoriui būdingi dažniai pateikti 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Aktualūs vibroizoliuojamų guolių pažeidimo dažniai  
**Table 1.** Actual damage frequencies of vibroisolated bearings

Guolio separatoriaus sukimosi dažnis	46,4 Hz
Rotoriaus sukimosi dažnis	112,5 Hz
Dvigubas rotoriaus sukimosi dažnis	225 Hz
Guolio rutuliukų perriedėjimo per išorinį žiedą dažnis	602,5 Hz
Guolio rutuliukų sukimosi dažnis	615,8 Hz
Guolio rutuliukų perriedėjimo per vidinį žiedą dažnis	859,7 Hz
Dvigubas guolio rutuliukų perriedėjimo per išorinį žiedą dažnis	602,5 Hz
Dvigubas guolio rutuliukų sukimosi dažnis	1231,5 Hz

Dėl guolio pažeidimų, be pagrindinių darbinių dažnių, atsiranda papildomi dažniai, todėl buvo nuspręsta sistemą tyrinėti ir esant šių dažnių diapazonams: 40–55 Hz, 110–190 Hz, 200–250 Hz, 480–600 Hz, 600–690 Hz, 795–885 Hz, 1215–1340 Hz, 2014–2080 Hz. Savųjų virpesių spektras ir perdavimo funkcijos esant ankščiau išdėstytiems diapazonams nuo impulsinio smūgio aprašyti literatūroje (Slivinskas *et al.* 2008).

Žadinimas impulsiniu smūgiu tiksliai įvertinant perdavimo funkciją leidžiamas tik sistemos savųjų dažnių srityse. Todėl buvo bandoma sistemą žadinti įvairiomis pastoviuųjų dažnių esant tam tikrai amplitudei žadinimo priemonėmis, leidžiančiomis keisti žadinimo dažnį. Taip būtų galima išsamiau įvertinti spyruoklės perdavimo funkciją.

### Tiriamosios sistemos žadinimo metodai

Buvo bandoma sistemą žadinti dinaminio garsiakalbiu. 4 paveiksle parodytas matavimo stendas ir naudojama įranga taikant šį metodą. Blokinė schema pateikta 5 paveiksle.

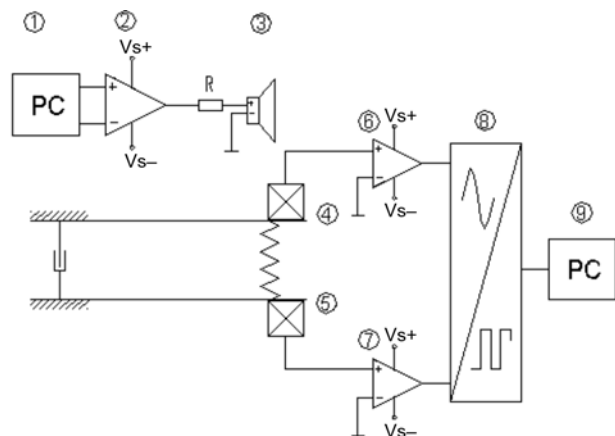


**4 pav.** Matavimo stendas žadinant akustiniu metodu: 2 – žemojo dažnio stiprintuvas; 3 – dinaminis garsiakalbis; 4 – įėjimo signalo jutiklis; 5 – išėjimo signalo jutiklis; 6 – įėjimo signalo stiprintuvas; 7 – išėjimo signalo stiprintuvas

**Fig. 4.** Measuring workbench for acoustic excitation method: 2 – low frequency amplifier; 3 – dynamic loudspeaker; 4 – input signal sensor; 5 – output signal sensor; 6 – input signal amplifier; 7 – output signal amplifier

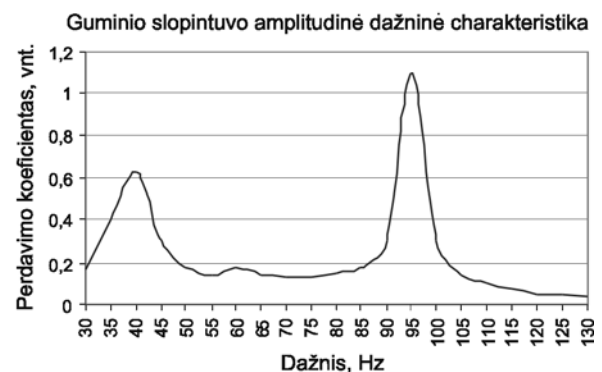
Akustinis garsiakalbis buvo statomas ant viršutinės stendo plokštės ir į jį siunčiamas įvairių dažnių sinusinės formos signalas. Dėl dinaminės garsiakalbio dalies judėjimo sistemos įėjime buvo sukeliama mechaniniai virpesiai.

Eksperimento metu pastebėta, kad, išėmus spyruoklę iš sistemos ir siunčiant sinusinį signalą iš generatoriaus į garsiakalbį, apatinė sistemos dalis pradeda virpėti. Po analizės padaryta išvada, kad virpesiai pereina per guminį



**5 pav.** Sistemos žadinimo akustiniu metodu blokinė schema: 1 – kompiuteris; 2 – žemojo dažnio stiprintuvas; 3 – dinaminis garsiakalbis; 4 – įėjimo signalo jutiklis; 5 – išėjimo signalo jutiklis; 6 – įėjimo signalo stiprintuvas; 7 – išėjimo signalo stiprintuvas; 8 – kompiuterio garso plokštė; 9 – kompiuteris

**Fig. 5.** Block-diagram for a acoustic system excitation: 1 – computer; 2 – low frequency amplifier; 3 – dynamic loudspeaker; 4 – input signal sensor; 5 – output signal sensor; 6 – input signal amplifier; 7 – output signal amplifier; 8 – computer sound plate; 9 – computer



**6 pav.** Matavimo stendo guminių slopintuvų amplitudinė dažninė charakteristika

**Fig. 6.** Amplitude-frequency characteristics of measuring workbench

slopintuvų. Toks reiškinys buvo aptiktas siaurame dažnių diapazone – apytiksliai 60–130 Hz (6 pav.).

Didinant įėjimo signalo amplitudę, diapazonas plečiasi, todėl buvo nuspręsta plokščių sistemas visiškai atskirti vieną nuo kitos. Kai plokštės buvo ant skirtingų paviršių, reiškinys nesikartojo.

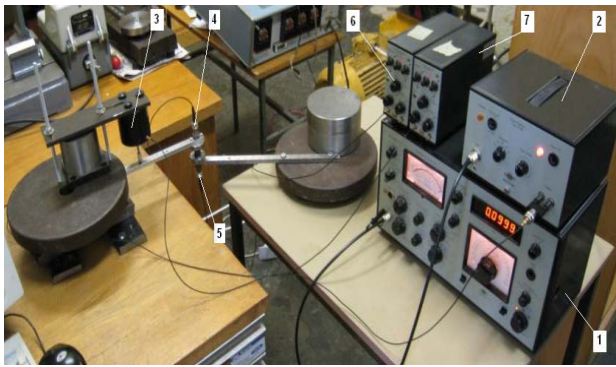
- Akustinės žadinimo metodikos pranašumai yra šie:
- platus dažnių atkūrimo diapazonas (60–10 000 Hz);
  - metodui nereikia specifinės įrangos.

Trūkumai:

- dėl garsiakalbio ir tiriamosios sistemos blogo kontakto atsiradęs papildomas triukšmas apsunkina tolesnį signalo apdorojimą;
- esant vidutiniams dažniams labai nepatogu atlikti tyrimus dėl akustinio slėgio.

Dėl visų šių trūkumų buvo nuspręsta atsisakyti tokios žadinimo metodikos.

Tolesni veiksmai: plokštės buvo atskirtos į atskiras sistemas, o sistemai žadinti naudotas elektromagnetinis vibratorius. Signalas iš generatoriaus buvo siunčiamas į stiprintuvą, o vėliau – į vibratorių. Signalų priėmimo blokinė schema nesiskyrė nuo akustinio žadinimo metodo. Galutinis stendo variantas parodytas 7 paveiksle.



**7 pav.** Matavimo stendas žadinant elektromagnetiniu vibratoriumi: 1 – žemojo dažnio generatorius; 2 – žemojo dažnio stiprintuvas; 3 – elektromagnetinis vibratorius; 4 – įėjimo signalo jutiklis; 5 – išėjimo signalo jutiklis; 6 – įėjimo signalo stiprintuvas; 7 – išėjimo signalo stiprintuvas

**Fig. 7.** Measuring workbench for electromagnetic excitation: 1 – low frequency generator; 2 – low frequency amplifier; 3 – electromagnetic vibrator; 4 – input signal sensor; 5 – output signal sensor; 6 – input signal amplifier; 7 – output signal amplifier

Remiantis 1 lentele, elektromagnetiniu vibratoriumi buvo atlikti tyrimai esant šiems dažnių intervalams: 40–55 Hz, 110–190 Hz, 200–250 Hz, 480–600 Hz, 600–690 Hz, 795–885 Hz, 1215–1340 Hz, 2014–2085 Hz.

### Tyrimo rezultatai

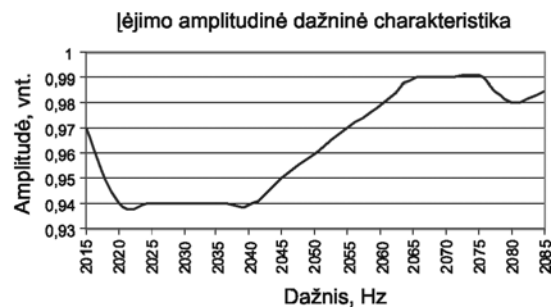
Kiekviename diapazone matuoti ir apdoroti įėjimo ir išėjimo signalai buvo įvertinti ir išanalizuoti. 8 paveiksle parodyti sistemos įėjimo ir išėjimo signalai, kurių dažnis 2015–2085 Hz.

Iš įėjimo signalo amplitudinės dažninės charakteristikos galima matyti, kad įėjimo signalo amplitudė šiek tiek keičiasi. Išėjimo signalo amplitudė taip pat kinta – stiprėjant dažniui didėja. 9 paveiksle pavaizduotas spyruoklės perdavimo koeficientas. Gauta kreivė rodo, kaip perduodamas tam tikro dažnio signalas. Iš grafiko aiškiai matyti, kad esant dažnių diapazonui 2015–2085 Hz perdavimo funkcija didėja.

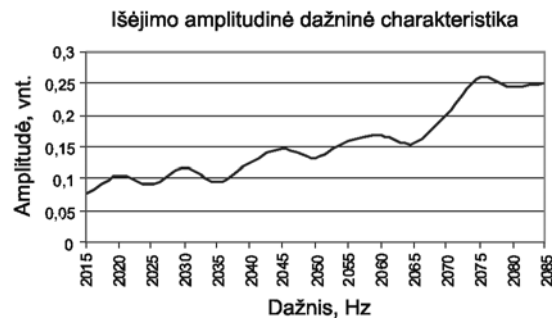
10 paveiksle parodytos aktualiausias dažnių diapazonų perdavimo koeficientų priklausomybės nuo žadinimo signalo dažnio. Dažnių diapazonui esant 1215–

1240 Hz spyruoklės perdavimo koeficientas didėja nuo 1215 Hz iki 1220 Hz, o toliau iki 1235 Hz signalas išlieka pastovus. Nuo 1235 Hz iki 1240 Hz signalo perdavimo funkcija mažėja.

Dažnių diapazone nuo 600 Hz iki 690 Hz perdavimo koeficientas turi maksimalią reikšmę esant 610 Hz, tai visiškai sutampa su ankstesniais eksperimentiniais rezultatais (Slivinskas *et al.* 2008). Nuo 620 Hz iki 690 Hz signalo perdavimo koeficientas mažėja. Dažnių intervale 110–250 Hz perdavimo funkcija turi maksimalią reikšmę esant 140 Hz, o – 190–200 Hz beveik tiesiškai mažėja.



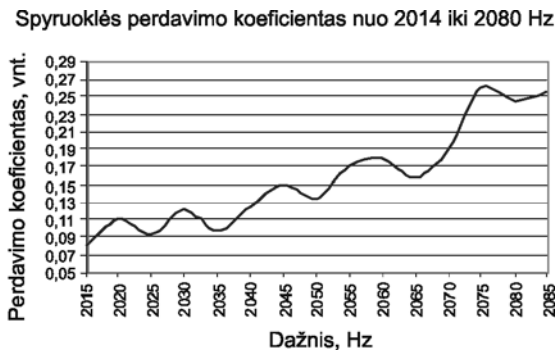
a)



b)

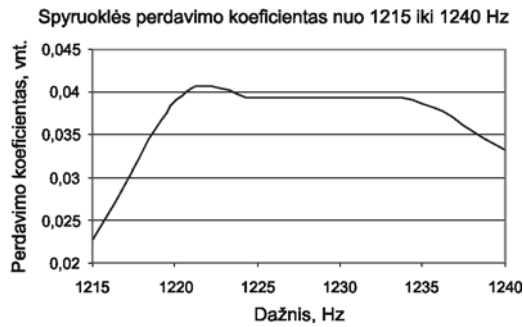
**8 pav.** Įėjimo (a) ir išėjimo (b) signalų amplitudinės dažninės charakteristikos

**Fig. 8.** Amplitude-frequency characteristics of input (a) and output (b) signals

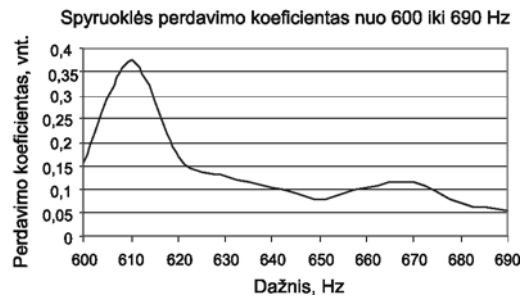


**9 pav.** Spyruoklės perdavimo koeficientas 2015–2085 Hz dažnių diapazone

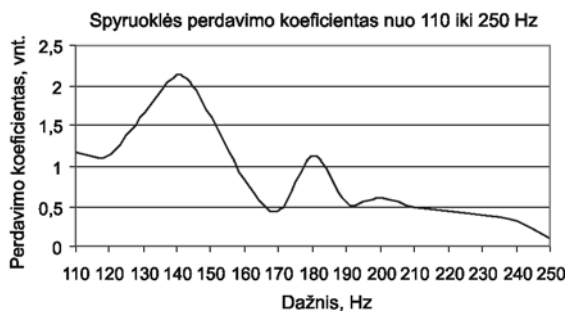
**Fig. 9.** Coefficient of transmission in frequency range of 2015–2085 Hz



a)



b)



c)

**10 pav.** Spyruoklės perdavimo koeficientas esant dažnių diapazonams: 1215–1240 Hz (a); 600–690 Hz (b); 110–250 Hz (c)

**Fig. 10.** Coefficient of transmission of spring in actual frequency ranges: 1215–1240 Hz (a); 600–690 Hz (b); 110–250 Hz (c)

Dažnių diapazonuose 110–160 Hz ir 175–185 Hz perdavimo koeficientas yra didesnis už vienetą. Manoma, kad tai vyksta dėl apatinės stendo dalies rezonanso reiškinių.

### Išvados

1. Matuotų įėjimo ir išėjimo signalų lygis skiriasi iki 15 kartų, todėl tirtajame dažnių diapazone sistema yra dinamiškai aktyvi.
2. Remiantis atliktų matavimų rezultatais aktualiausiuose sistemos dažnių diapazonuose, nustatyta, kad tiriama sistema – spyruoklė perduoda įėjimo signalą. Keičiant įėjimo signalo dažnį, spyruoklės koeficiento reikšmė keičiasi.

3. Norint taikyti vibroizoliuotų guolių neardomojo metodo kontrolę, būtina įvertinti spyruoklės perdavimo funkciją. Jeigu spyruoklės perdavimo koeficientas esant pasirinktiems dažniams nepakankamas, galima papildomai naudoti kito standumo spyruoklę, kuri perduotų diagnostinei informacijai reikalingus virpesius į sistemos korpusą.

### Padėka

Dėkojame doc. dr. Vytautui Slivinskui už programinės įrangos („Prakalbinkime kompiuteri“) paketą ir naudojimo metodikos pateikimą.

### Literatūra

- Barzdaitis, V.; Činikas, G. 1998. *Monitoring and Diagnostics of Rotor Mashines*. Kaunas: Technologija. 366 p.
- Slivinskas, V.; Slivinskas, K.; Trumpa, A. 2009. Creating of the mathematical model of a resilient support spring type element and its transfer function from the input and output impulse responses, *Journal of Vibroengineering* 11(1): 149–157.
- Slivinskas, V.; Šimonytė, V. 2006. Estimation of parameters of impulse responses of mechanical systems by modified Prony method, in *Solid State Phenomena. Mechatronic Systems and Materials: a collection of papers from the 1st international conference (MSM 2005), Vilnius, Lithuania*. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications Inc., 113: 190–194.
- Фролова, К. В. 1981. *Вибрации в технике*. Москва.

### RESEARCH ON TRANSFERING THE DYNAMIC PROCESS BY THE SPRING

V. Bučinskas, J. Dmitrijev

#### Abstract

The article describes the particulars of transferring the dynamic process applying the spring and explains the possibilities of diagnostics for support bearings insulated from the external body using resilient elements. The carried out research has revealed methodology for investigation and suggested a suitable research stand. The input signal of impulse type was submitted to the system to observe free oscillations in the stand. Also, the system was stimulated employing an electromagnetic vibrator to research the transfer function of the spring. Finally, using output and input signals at the ends of the spring, the transfer function was derived.

**Keywords:** diagnostics, bearings, dynamical methods, experimental research.