

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS

DARIUS EIDUKYNAS

**PJEZOELEKTRINIO SMŪGINIO ENERGIJOS SURINKIMO
PRIETAISO, GENERUOJANČIO SLOPSTANČIŪJŲ VIRPESIŲ
SIGNALĄ, KŪRIMAS IR TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

2017, Kaunas

Disertacija rengta 2012–2017 metais Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute.

Mokslinis vadovas:

Doc. dr. Vytautas JŪRĖNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Redagavo:

Inga Nanartonytė (leidykla „Technologija“)

Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. habil. dr. Vytautas OSTAŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T) – **pirmininkas**;

Habil. dr. Algimantas BUBULIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

Prof. dr. Sergei KRUCHININ (Bogoliubovo teorinės fizikos institutas, Ukraina, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

Prof. dr. Juozas PADGURSKAS (Aleksandro Stulginskio universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Disertacija bus ginama viešame mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2017 m. gegužės 5 d. 12 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. + 370 37 300 042; faks. + 370 37 324 144; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2017 m. balandžio 5 d.

Su disertacija galima susipažinti interneto svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas) ir Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, 53361 Akademija, Kauno r.) bibliotekose.

IVADAS

Temos aktualumas

Energijos surinkimas, kuris bendroju atveju yra aplinkos energijos vertimas į naudingąją elektros energiją, šiuo metu tarp mokslininkų ir pramonės vartotojų yra viena populiariausių sričių dėl siekiamybės pailginti elektroninių prietaisų veikimo laiką. Energijos surinkimo prietaisai gali sumažinti tradicinių maitinimo šaltinių dydį, o tai leistų sumažinti viso įrenginio, kuriame jie naudojami, matmenis bei masę. Be to, energijos surinkimo prietaisai gali būti naudojami vietose, kur yra sudėtinga remontuoti, pakeisti tradicinius maitinimo šaltinius ar baterijas arba tai apskritai neįmanoma, pvz., implantuotuose medicinos įrenginiuose, kosmoso technologijose ir pan.

Tradicinių energijos surinkimo prietaisų veikimas paremtas penkiais pagrindiniais energijos konvertavimo principais: fotoelektriniu, termoelektriniu, elektrostatiniu, elektromagnetiniu ir pjezoelektriniu, kuris šiuo metu yra plačiausiai taikomas dėl santykinai paprastos konstrukcijos, tiesioginio energijos vertimo ir didžiausio generuojamos elektros energijos tankio, palyginti su kitais.

Energijos surinkimo prietaisų, naudojamų mechaninei aplinkos energijai versti į elektros energiją, veikimo principas paremtas rezonanso reiškiniu, t. y. jie generuoja didžiausią elektros energijos galią tuomet, kada yra žadinami harmoniniais virpesiais, kurių dažnis yra lygus arba artimas paties energijos surinkimo prietaiso rezonansiniam dažniui. Jeigu aplinkos virpesių dažnis nesutampa su energijos surinkimo prietaiso rezonansiniu dažniu, generuojama elektros energijos galia gerokai sumažėja. Todėl daugelis iš sukurtų energijos surinkimo įrenginių negali būti efektyviai naudojami praktikoje, nes aplinkos mechaniniai virpesiai dažniausiai yra atsitiktiniai, kintamo dažnio. Dėl šios priežasties pastarąjį dešimtmetį tyrinėjami smūginiai energijos surinkimo prietaisai, kurie sužadinami smūgio efektu. Dalies tokių prietaisų konstrukcijos yra grįstos gembės principu, kituose prietaisuose smūgiuojama tiesiai į pjezoelektrinę medžiagą. Abiejų tipų energijos surinkimo prietaisai didžiausią elektros energijos galią generuoja tuomet, kai jie po smūgio reiškinio ima virpėti rezonansiniu dažniu. Dėl to visi energijos surinkimo prietaisai turi rezonatorius (gembės arba pjezoelektrinę konstrukciją, į kurią tiesiogiai smūgiuojama), kurie skirti energijos surinkimo prietaiso rezonansiniam dažniui generuoti, kai prietaisas paveikiamas smūgio efektu.

Pagrindinis rinkoje sukurtų smūginių energijos surinkimo prietaisų trūkumas yra tai, kad jų generuojamo signalo dažnis yra santykinai žemas – iki 4 kHz. Kitas esamų prietaisų, ypač tų, kurie smūgį generuoja tiesiogiai į pjezoelektrinę medžiagą, trūkumas yra nepakankama pjezoelektrinės medžiagos apsauga nuo smūgio reiškinio – po kelių ar keliolikos energijos sugeneravimo ciklų pjezoelektrinė medžiaga gali įtrūkti arba visiškai suirti. Be to, beveik visuose praktikoje naudojamuose energijos surinkimo prietaisuose sugeneruotas elektrinis

signalas perduodamas į tradicines energijos talpyklas, pvz., baterijas, kondensatorius ir pan.

Rengiant šį darbą sukurtas ir ištirtas naujas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas. Toks prietaisas generuoja ultragarsinio dažnio slopstančiųjų virpesių tipo elektrinį signalą, yra pritaikytas tam tikro darbinio dažnio ultragarsinei pavarai tiesiogiai valdyti ir gali veikti kaip alternatyvus energijos šaltinis tuomet, kai yra neįmanoma naudoti tradicinių elektrinių signalų generatorių arba kai šie sugenda. Tai sumažina ultragarsinių pavarų eksploataavimo klaidų riziką, kai tradiciniai energijos šaltiniai sugenda arba kai jų tam tikroje aplinkoje, pvz., gamtoje, kosmose ir pan., neįmanoma naudoti. Kadangi sukurtas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas tinka tiek linijinei, tiek sukamajai ultragarsinei pavarai valdyti, toks valdymo metodas padidina precizinių ultragarsinių pozicionavimo pavarų eksploatacijos patikimumą. Be to, sukurtas prietaisas turi rezonatoriaus tipo bangolaidį, kuris apsaugo pjezoelektrinę medžiagą nuo smūgio reiškinio.

Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Tyrimo tikslas – sukurti ir ištirti pjezoelektrinį smūginį energijos surinkimo prietaisą, generuojantį slopstančiųjų virpesių signalą, ir pritaikyti jį ultragarsinei pavarai valdyti.

Tyrimo tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai:

1. Atlikti literatūros šaltinių apie vibracinius bei smūginius energijos surinkimo prietaisus, mechaninio smūgio generavimo metodus, specialiosios formos bangolaidžius, kurie naudojami kaip rezonatoriai, ir ultragarsinių variklių valdymo metodus analizę. Nustatyti pagrindinius energijos surinkimo prietaisų privalumus ir trūkumus.
2. Suprojektuoti naują pjezoelektrinį smūginį energijos surinkimo prietaisą ir atlikti teorinius tyrimus sumodeliuojant mechaninį smūgį ir specialiosios formos bangolaidį su harmoniniu ir smūginiu žadinimu ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą.
3. Ištirti suprojektuotą pjezoelektrinį smūginį energijos surinkimo prietaisą atliekant eksperimentinius mechaninio smūgio, specialiosios formos bangolaidžių ir ultragarsinės pavaros valdymo tyrimus.
4. Sukurti ir ištirti pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso projektavimo metodologiją konkrečiai ultragarsinei pavarai valdyti.

Tyrimų metodai

Rengiant šį darbą atlikti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai. Teoriniai tyrimai atlikti keliais metodais – analitiniu ir baigtinių elementų metodu – panaudojant ANSYS 17.1 bei SOLIDWORKS 2016 programų paketus.

Teorinių tyrimų rezultatai buvo pagrįsti eksperimentiniais tyrimais, atliktais Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute bei Technologinių

sistemų diagnostikos institute. Eksperimentinių tyrimų metu bangolaidžių paviršiaus poslinkiams matuoti buvo panaudoti 1 bei 3 taškų lazerinės vibrometrijos skeneriai („Polytec“), holografinės interferometrijos matavimo sistema PRISM 100 („Hytec“), impedanso analizatorius 6500 („Wayne Kerr“) ir aukštųjų dažnių diapazono pagreičio matuokliai („Bruel and Kjaer“). Tiriamiems signalams apdoroti panaudota „PicoScope“ aparatūrinė ir programinė įranga. Skleidžiamo triukšmo lygiui nustatyti panaudotas garso lygio matuoklis „Investigator 2260“ („Bruel and Kjaer“).

Mokslinis naujumas

1. Suprojektuotas naujas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas, skirtas ultragarsinio dažnio slopstančiųjų virpesių tipo signalui generuoti, turintis tam tikro dažnio rezonatorių – specialiosios formos bangolaidį, kuris padidina generuojamo signalo amplitudę ir apsaugo trapią pjezoelektrinę medžiagą nuo smūgio reiškinio.

2. Suprojektuotas ir ištirtas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas, skirtas ultragarsinei pavarai tiesiogiai valdyti. Toks prietaisas leidžia valdyti ultragarsinę pavarą, kai tradiciniai energijos šaltiniai, pvz., maitinimo šaltiniai ar baterijos, sugenda arba kai tam tikroje aplinkoje jų naudoti negalima.

3. Specialiosios formos bangolaidis ištirtas iki šiol netirtu būdu – kai harmoninis ir smūginis žadinimas vyksta ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą, taip sudarant sąlygas smūgio energiją tolygiai paskleisti ir perduoti pjezoelektriniam keitikliui visu paviršiumi, turinčiu didesnę skerspjūvio plotą.

4. Sukurta pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso projektavimo metodologija, pagrįsta eksperimentiniais tyrimais, ir įrodytas šios metodikos pritaikomumas praktikoje.

Praktinė vertė

Sukurta ir ištirtas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas, skirtas ultragarsinio dažnio slopstančiųjų virpesių tipo signalui generuoti, kuris gali būti panaudojamas ultragarsinei pavarai tiesiogiai valdyti. Toks prietaisas gali veikti kaip alternatyvus energijos šaltinis tada, kai tradicinių elektrinių signalų generatorių naudoti neįmanoma arba kai šie sugenda. Tai sumažina ultragarsinių pavarų eksploatavimo klaidų riziką, kai tradiciniai energijos šaltiniai sugenda arba kai jų tam tikroje aplinkoje, pvz., gamtoje, kosmose ir pan., naudoti neįmanoma. Kadangi sukurtas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas tinka tiek linijinei, tiek sukamajai ultragarsinei pavarai valdyti, toks įrenginys padidina precizinių ultragarsinių pozicionavimo pavarų eksploatacijos patikimumą.

Disertacijos apibavimas

Pagrindiniai disertacijos tyrimų rezultatai buvo pristatyti šešiose mokslinėse publikacijose: trys straipsniai publikuoti ISI duomenų bazėje referuojamuose leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą, vienas straipsnis – kitoje tarptautinėje duomenų bazėje referuojamame leidinyje, du straipsniai – konferencijų pranešimų medžiagoje.

Tyrimų rezultatai taip pat buvo pristatyti keturiuose tarptautinėse mokslinėse konferencijose: „Vibroengineering-2014“ Lenkijoje, „Mechanika 2015“ Kaune, „Mechatronic Systems and Materials 2015“ Kaune bei „Mechanika 2016“ Kaune.

Pateikta mokslinio išradimo paraiška Lietuvos Respublikos patentui gauti.

Darbo struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų sąrašai.

Pirmajame disertacijos skyriuje analizuojami literatūros šaltiniai apie vibracinius bei smūginius energijos surinkimo prietaisus, mechaninio smūgio generavimo metodus, specialiosios formos bangolaidžius, kurie naudojami kaip rezonatoriai, ir ultragarsinių variklių valdymo metodus.

Antrajame skyriuje suprojektuotas naujas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas ir atliekant teorinius tyrimus sumodeliuotas mechaninis smūgis, specialiosios formos bangolaidis su harmoniniu ir smūginiu žadinimu ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą.

Trečiajame disertacijos skyriuje pateikti eksperimentinių tyrimų rezultatai. Ištirtas suprojektuotas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas atliekant eksperimentinius mechaninio smūgio, specialiosios formos bangolaidžių ir ultragarsinės pavaros valdymo tyrimus.

Ketvirtajame skyriuje pateikta sukurta ir ištirta pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso projektavimo metodologija konkrečiai ultragarsinei pavarai valdyti. Eksperimentiniais tyrimais patvirtintas šios metodologijos pritaikomumas. Pagal LST standartą išmatuotas pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso keliamo triukšmo lygis.

Bendrosiose išvadose pateikiami pagrindiniai teorinių bei eksperimentinių tyrimų rezultatai.

Disertacijos apimtis yra 110 puslapių. Darbe pateiktos 89 iliustracijos, 12 lentelių ir 7 puslapiai priedų.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Tradiciniai energijos surinkimo prietaisai paremti penkiais pagrindiniais energijos konvertavimo principais: fotoelektriniu, termoelektriniu, elektromagnetiniu, elektrostatiniu ir pjezoelektriniu. Pastarasis šiais laikais yra plačiausiai taikomas dėl santykinai paprastos konstrukcijos, tiesioginio energijos vertimo, didžiausio generuojamos energijos tankio, palyginti su kitais, ir dėl to,

jog prietaisams, paremtiems šiuo veikimo principu, nereikia pradinių įtampos šaltinių.

Energijos surinkimo prietaisų, naudojamų mechaninei aplinkos energijai versti į elektros energiją, veikimo principas paremtas rezonanso reiškiniu. Tai yra jie didžiausią elektros energijos galią generuoja tada, kai yra žadinami harmoniniais virpesiais, kurių dažnis yra lygus arba artimas paties energijos surinkimo prietaiso rezonansiniam dažniui. Jeigu aplinkos virpesių dažnis nesutampa su energijos surinkimo prietaiso rezonansiniu dažniu, generuojama elektros energijos galia gerokai sumažėja. Todėl daugelis sukurtų energijos surinkimo įrenginių negali būti efektyviai naudojami praktikoje, nes aplinkos mechaniniai virpesiai dažniausiai yra atsitiktiniai, kintamo dažnio. Dėl šios priežasties pastarąjį dešimtmetį tyrinėjami smūginiai energijos surinkimo prietaisai, kurie sužadinami smūgio efektu.

Apžvelgus literatūrą galima teigti, kad įprastai naudojamų smūginių energijos surinkimo prietaisų konstrukcijos yra grįstos gembės principu. Taip pat žinoma prietaisų, kuriuose smūgiuojama tiesiai į pjezoelektrinę medžiagą. Abiejų tipų energijos surinkimo prietaisai didžiausią elektros energijos galią generuoja tada, kai jie po smūgio reiškinio ima virpėti rezonansiniu dažniu. Dėl to visi energijos surinkimo prietaisai turi rezonatorius (gembės arba pjezoelektrinę konstrukciją, į kurią tiesiogiai smūgiuojama), kurie skirti energijos surinkimo prietaiso rezonansiniam dažniui generuoti, kai jis paveikiamas smūgio efektu.

Pagrindinis rinkoje sukurtų smūginių energijos surinkimo prietaisų trūkumas yra tai, kad jų generuojamo signalo dažnis yra santykinai žemas – iki 4 kHz. Kitas esamų prietaisų, ypač tų, kurie smūgį generuoja tiesiogiai į pjezoelektrinę medžiagą, trūkumas yra nepakankama pjezoelektrinės medžiagos apsauga nuo smūgio reiškinio. Dėl šio trūkumo po kelių ar keliolikos energijos sugeneravimo ciklų pjezoelektrinė medžiaga gali įtrūkti arba visiškai suirti. Be to, beveik visuose praktikoje naudojamuose energijos surinkimo prietaisuose sugeneruotas elektrinis signalas perduodamas į tradicines energijos talpyklas, pvz., baterijas, kondensatorius ir pan.

Mechaninio smūgio reiškinys šiais laikais yra taikomas įvairiose srityse. Galima išskirti du pagrindinius mechaninio smūgio generatorių – smūgiuotuvų tipus: mechaninius ir nemechaninius. Pirmieji gali būti valdomi įrenginių (pvz., pneumatinių, hidraulinių) arba žmogaus. Šis smūgiuotuvų tipas iš esmės paremtas švytuoklės ir plaktuko principu, o tai apsunkina vienodą smūgio parametru, pvz., amplitudės ir trukmės, atkartojamumą esant keliems pasikartojantiems smūgiams. Antrasis smūgiuotuvų tipas paprastai būna paremtas pjezoelektriniu principu, kai pjezoelektrinis vykdiklis veikia kaip smūgio generatorius, arba sprogoimo reiškiniu. Naudojant abiejų tipų smūgiuotuvus galima generuoti smūgį ir valdyti jo parametrus – amplitudę, smūgio pagreitį, sugeneruoto impulso dažnį, trukmę ir pan.

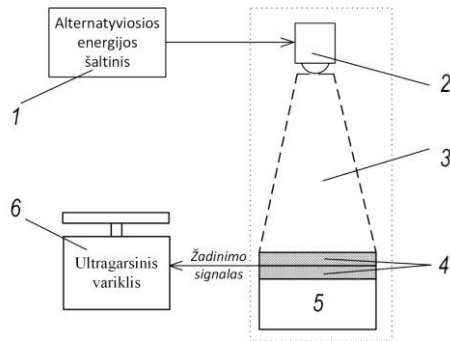
Norint padidinti pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso rezonansinį dažnį, apsaugoti pjezoelektrinę medžiagą nuo smūgio reiškinių ir padidinti smūginio žadinimo energiją, gali būti naudojami specialiosios formos bangolaidžiai, šiuo atveju veikiantys kaip rezonatoriai. Literatūros apžvalga parodė, jog specialiosios formos bangolaidžiai gali būti naudojami labai plačiai – pradedant mechaninėmis apdirbimo technologijomis, baigiant kosmoso tyrinėjimais ar mikrochirurgija. Nepaisant jų panaudojimo srities, visi tyrinėti specialiosios formos bangolaidžiai yra skirti virpesių amplitudei didinti padidinant energijos bangų tankį, mažinant skerspjūvio plotą. Būtent dėl šios priežasties visi praktikoje bei teorijoje aptinkami bangolaidžiai buvo nagrinėjami, kai jų žadinimas buvo harmoninis ir vyko ant paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, o stipresnės vibracijos buvo ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą.

Literatūros apie ultragarsinių variklių valdymo technikas apžvalga atskleidė, kad šiuo metu rinkoje yra daugybė ultragarsinių variklių panaudojimo sričių itin tiksliose pozicionavimo sistemose, tokiose kaip robotų lankstai, automatinės fokusavimo sistemos, MEMS ir pan. Vieni iš labiausiai paplitusių ultragarsinių variklių yra pjezoelektriniai varikliai. Skiriami du pagrindiniai pjezoelektrinių variklių tipai – linijiniai bei sukamieji. Abiejų tipų varikliai judesį generuoja savo rezonansinėmis vibracijomis, sukeltomis pjezoelektrinių elementų atvirkštinio pjezoelektrinio efekto. Norint, kad pjezoelektrinių variklių judesys būtų pastovus, jų žadinimo signalas turi būti harmoninis. O norint, kad pjezoelektrinių variklių judesys būtų žingsninis, jų žadinimo signalas turi būti slopstančiųjų virpesių tipo. Dauguma pjezoelektrinių variklių, naudojamų įvairiais tikslais, yra žadinami panaudojant įvairius elektrinių signalų generatorius. Tokiam ultragarsinių variklių valdymo būdui reikia elektros energijos šaltinio, todėl ultragarsiniai varikliai negali būti naudojami vietose, kuriose elektros energija yra neprieinama.

2. TEORINIAI PJEZOELEKTRINIO SMŪGINIO ENERGIJOS SURINKIMO PRIETAISO TYRIMAI

2.1. Pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso struktūra ir veikimo principas

Kuriamo pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso, skirto ultragarsinio dažnio slopstančiųjų virpesių tipo signalui generuoti, principinė schema pateikta 2.1 pav.



2.1 pav. Principinė kuriamo pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso schema: 1 – maitinimo šaltinis, 2 – smūgiuotuvas, 3 – specialiosios formos bangolaidis, 4 – pjezoelektrinis keitiklis, 5 – atsvaras, 6 – ultragarsinis variklis

Kuriamą pjezoelektrinį smūginį keitiklį (žr. 2.1 pav.) sudaro: alternatyviosios energijos šaltinis 1, pvz., termoelektrinis, saulės baterijos, žmogaus raumenų jėga ir pan.; smūgio generatorius 2, pvz., plaktukas su kintamo kietumo antgaliais, pjezoelektrinis smūgiuotuvas ir pan.; specialiosios formos bangolaidis 3, suprojektuotas konkrečiam ultragarsiniam varikliui valdyti; Lanževano (Langevin) tipo pjezoelektrinis keitiklis 4, sudarytas iš pjezoelektrinių žiedų; atsvaras 5 ir norimas valdyti ultragarsinis variklis 6.

Pateiktame pjezoelektriniame energijos surinkimo prietaise mechaninio smūgio energija generuojama ant specialiosios formos bangolaidžio paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą, ir tolygiai paskleidžiant perduodama paviršiumi, turinčiam didesnę skerspjūvio plotą. Taip gaunamas bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, tolygus judesys. Šis paviršius visu savo plotu perduoda judesį bei energiją Lanževano tipo pjezoelektriniam keitikliui. Bangolaidžio paviršius, turintis didesnę skerspjūvio plotą, atitinka pjezoelektrinių žiedų matmenis, todėl pjezoelektrinis keitiklis gali generuoti didžiausios amplitudės ir savojo dažnio slopstančiųjų virpesių elektrinį signalą ultragarsinei pavarai valdyti. Lanževano tipo pjezoelektrinis keitiklis tiesiogiai sujungtas su ultragarsiniu varikliu, todėl nuo vieno mechaninio smūgio gaunamas tam tikro dydžio ultragarsinės pavaros judesys išvengiant bet kokių tarpinių elementų ar įprastų ultragarsinės pavaros valdymo metodų. Dar vienas kuriamo pjezoelektrinio energijos surinkimo prietaiso privalumas yra tai, kad rezonatoriaus tipo specialiosios formos bangolaidis apsaugo pjezoelektrinį keitiklį nuo tiesioginio smūgio efekto ir kartu nuo galimo įtrūkimo ar visiško sulūžimo.

Be to, toks pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas (žr. 2.1 pav.) gali veikti kaip alternatyvus energijos šaltinis, kai tradicinių elektrinių signalų generatorių naudoti neįmanoma arba kai šie sugenda. Tai sumažina ultragarsinių pavarų eksploatavimo klaidų riziką, kai tradiciniai energijos šaltiniai sugenda ar kai tam tikroje aplinkoje, pvz., gamtoje, kosmose ir pan., jų naudoti

nejmanoma. Kadangi kuriamas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas tinka tiek linijinei, tiek sukamajai ultragarsinei pavarai valdyti, toks valdymo metodas padidina precizinių ultragarsinių pozicionavimo pavarų eksploatacijos patikimumą.

Generuojamo slopstančiųjų virpesių signalo parametrai gali būti valdomi dviem būdais: keičiant mechaninio smūgio parametrus, pvz., amplitudę ir trukmę, arba keičiant specialiosios formos bangolaidžio formą, pvz., geometrinę formą, ilgį ir pan.

2.2. Teoriniai mechaninio smūgio tyrimai

Mechaninio smūgio parametrų – amplitudės ir trukmės (dažnio) – priklausomybė nuo smūgio metu kontaktuojančių medžiagų parametrų tirta naudojant ANSYS „Explicit Dynamics“ programinę įrangą. Modeliavimo rezultatai parodė, kad generuojamo smūgio parametrai – dažnis ir amplitudė – labai priklauso nuo smūgio metu kontaktuojančių medžiagų. Dėl šio fakto svarbu kuriamame pjezoelektriniame smūginiame energijos surinkimo prietaise mechaninio smūgio generatoriaus parametrus parinkti labai tiksliai atsižvelgiant į norimo valdyti ultragarsinio variklio parametrus.

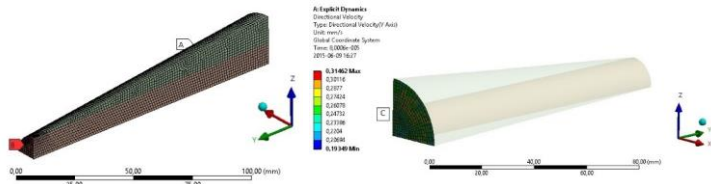
2.3. Teoriniai specialiosios formos bangolaidžių tyrimai

2.3.1. Teoriniai specialiosios formos bangolaidžių tyrimai, kai vyksta harmoninis žadinimas ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą

Siekiant nustatyti, kokią įtaką paviršiaus virpesiams turi bangolaidžio geometrinė forma, kai žadinimas vyksta ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą, atliktas kompiuterinis bangolaidžių modeliavimas pasinaudojant ANSYS harmoninio atsako charakteristikos programine įranga. Šio modeliavimo metu buvo tiriama dviejų formų – A ir B (atitinkamai cilindro ir kūgio formos) – bangolaidžiai. Žadinimas buvo harmoninis, t. y. sinuso dėsnio kintančia 1 N jėga, pridėta ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą. Jėgos pridėjimo kūnas atitiko pjezoelektrinio smūgio generatoriaus geometrinius matmenis, žadinimo dažnis buvo intervale tarp 5 kHz ir 30 kHz . Modeliavimas parodė, jog kūginio bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesių amplitudė yra $1,87$ karto didesnė negu cilindrinio bangolaidžio, kai žadinimo sąlygos yra tokios pačios. Tai parodo, jog bangolaidžio forma turi didelę įtaką paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesiams, kai žadinimas vyksta ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą. Dėl šios priežasties toliau atlikti įvairių formų bangolaidžių tyrimai, kai vyksta smūginis žadinimas ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą.

2.3.2. Teoriniai specialiosios formos bangolaidžių tyrimai, kai vyksta smūginis žadinimas ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą

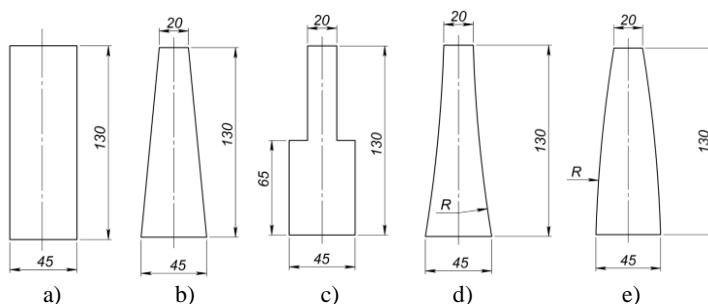
Siekiant ištirti mechaninio smūgio parametrų priklausomybę nuo įvairių bangolaidžių formų pasinaudojant ANSYS „Explicit Dynamics“ sukurtas skaičiuojamasis modelis pateiktas 2.2 pav.



2.2 pav. Skaičiuojamasis modelis su kraštinėmis sąlygomis, kai bangolaidis yra kūgio formos

Dėl nagrinėjamo modelio simetrijos sumodeliuotas ketvirtis bangolaidžio. Atliekant šį tyrimą bangolaidžiai buvo pagaminti iš plieno „Steel 1006“; buvo žadinama 1 N jėga, pridėta tam tikram laikui ant paviršiaus *B* (20 mm skersmens apskritimas). Toks žadinimas atitinka smūgio reiškinį. Kraštinės sąlygos viso tyrimo metu buvo vienodos: bangolaidžiai įtvirtinti kraštine *A* (tam tikru atstumu nuo paviršiaus *C*) 0 mm/s greičiu *y* kryptimi ir dviem plokštumomis 0 mm/s greičiu atitinkamai *x* ir *z* kryptimis (žr. 2.2 pav.).

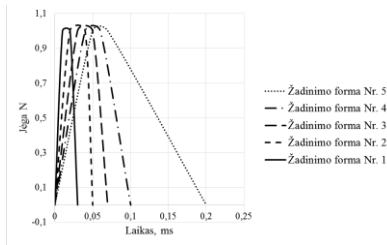
Atliekant teorinius tyrimus sumodeliuotos penkios skirtingos bangolaidžių formos. Jų geometriniai matmenys pateikti 2.3 pav.



2.3 pav. Sumodeliuotos bangolaidžių formos: a) cilindrinė; b) kūginė; c) laiptuota; d) panaši į eksponentę; e) panaši į atvirkštinę eksponentę

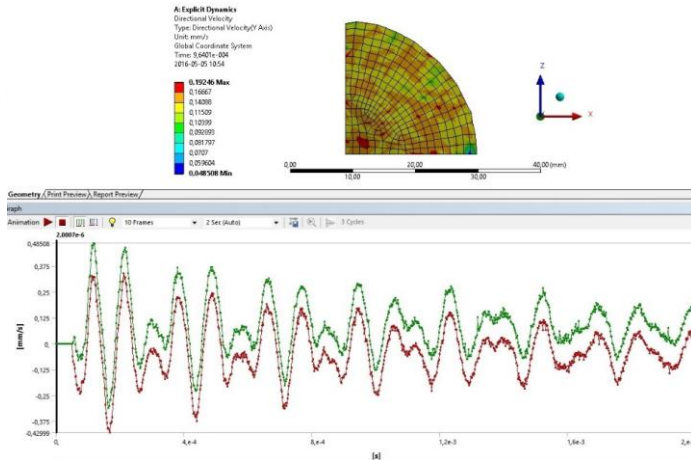
Pirmausia modeliuota su kūgio formos bangolaidžiu siekiant nustatyti paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesių greičio amplitudės priklausomybę nuo žadinimo smūgio formos. Šio modeliavimo metu žadinimo smūgis turėjo tą pačią 1 N jėgos amplitudę, skyrėsi jos pridėjimo laikas. Tokia

forma pasirinkta siekiant nustatyti, kaip smūgio trukmė veikia rezonansinius bangolaidžių virpesius. Modeliuotos žadinimo impulso formos pateiktos 2.4 pav.



2.4 pav. Modeliuotos žadinimo impulso formos

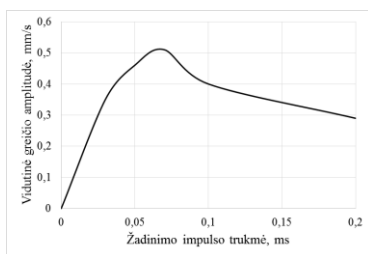
Modeliuojant nustatyti didžiausi ir mažiausi viso paviršiaus *C* (turinčio didesnę skerspjūvio plotą) greičiai y kryptimi. Kaip pavyzdys 2.5 pav. pateikti modeliavimo rezultatai – didžiausios ir mažiausios viso paviršiaus *C* greičio amplitudės y kryptimi, kai bangolaidis yra kūgio formos, o žadinimo forma – Nr. 2. Žalia kreivė atitinka didžiausią viso paviršiaus *C* greičio reikšmę y kryptimi, raudona kreivė – mažiausią reikšmę.



2.5 pav. Didžiausios ir mažiausios viso paviršiaus *C* greičio amplitudės y kryptimi, kai bangolaidis yra kūgio formos, žadinimo forma – Nr. 2

Dėl akivaizdžiai matomo (2.5 pav.) santykinai didelio šių greičių reikšmių išsibarstymo visuose toliau pateiktuose modeliavimo rezultatuose nurodytos vidutinės paviršiaus *C* greičio amplitudės reikšmės.

Modeliavimo rezultatai – vidutinės paviršiaus *C* greičio amplitudės y kryptimi priklausomybė nuo žadinimo impulso trukmės – pateikti 2.6 pav.



2.6 pav. Vidutinės paviršiaus C greičio amplitudės γ kryptimi priklausomybė nuo žadinimo impulso trukmės

Kaip matyti 2.6 pav., didžiausia vidutinė paviršiaus C greičio amplitudė (0,51 mm/s) gaunama, kai žadinimo impulso trukmė yra 0,07 ms, tai atitinka trečiąją žadinimo formą (žr. 2.4 pav.). Šie rezultatai parodo, kad didžiausias paviršiaus C greitis, o kartu ir didžiausia virpesių amplitudė yra tada, kai žadinimo dažnis (impulso trukmė) yra artimas pusei bangolaidžio rezonansinio dažnio periodo arba ją atitinka.

Antrasis modeliavimas atliktas siekiant nustatyti bangolaidžio įtvirtinimo vietos įtaką rezonansiniams bangolaidžių virpesiams. Nustatyta, kad didžiausia vidutinė paviršiaus C greičio amplitudė yra tada, kai bangolaidis yra įtvirtintas jo masės centre.

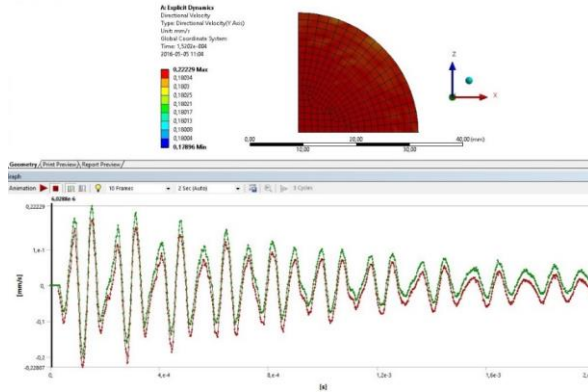
Trečiasis modeliavimas atliktas siekiant nustatyti bangolaidžio formos įtaką paviršiaus C greičio amplitudei. Šio modeliavimo metu visų formų (2.3 pav.) bangolaidžiai buvo įtvirtinti jų masės centre, žadinimas atitiko trečiąją žadinimo formą (2.4 pav.). Nustatyta, jog didžiausia vidutinė paviršiaus C greičio amplitudė γ kryptimi yra tada, kai bangolaidis yra į eksponentę panašios formos (0,65 mm/s), mažiausia (0,17 mm/s) – kai bangolaidis yra cilindrinis.

Be virpesių amplitudės, pjezoelektriniame smūginiame energijos surinkimo prietaise bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, visų taškų sinfaziškas-tolygus judėjimas taip pat yra labai svarbus aspektas. Dėl šios priežasties nustatytas paviršiaus C (turinčio didesnę skerspjūvio plotą) mažiausios ir didžiausios greičių amplitudės skirtumas, – kuo jis mažesnis, tuo paviršius C tolygiau juda. Šis skirtumas esant visoms modeliuotoms bangolaidžių formoms pateiktas 1 lent.

1 lentelė. Skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios paviršiaus C greičio reikšmės

Bangolaidžio forma	Didžiausias greitis, mm/s	Mažiausias greitis, mm/s	Skirtumas
Cilindrinė	0,25	0,15	0,10
Kūginė	0,62	0,41	0,21
Laiptuotoji	0,26	0,20	0,06
Panaši į eksponentę	0,75	0,56	0,19
Panaši į atvirkštinę eksponentę	0,53	0,38	0,15

Kaip matoma 1 lent., mažiausias paviršius, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, greičio amplitudės skirtumas (0,06 mm/s) yra tada, kai bangolaidis yra laiptuotas, didžiausias (0,21 mm/s) – kai kūginis. Siekiant įsitikinti šių duomenų patikimumu, 2.7 pav. pateikti modeliavimo rezultatai – didžiausios ir mažiausios viso paviršiaus C greičio amplitudės y kryptimi, kai bangolaidis yra laiptuotas, įtvirtintas jo masės centre, o žadinimo forma – Nr. 3.



2.7 pav. Didžiausios ir mažiausios viso paviršiaus C greičio amplitudės y kryptimi, kai bangolaidis yra laiptuotas, žadinimo forma – Nr. 3

Lyginant modeliavimo rezultatus, pateiktus 2.7 pav., su rezultatais, pateiktais 2.5 pav., ir įvertinant 1 lent. duomenis, matoma, kad paviršius, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, greičių skirtumas kur kas mažesnis, kai bangolaidis yra laiptuotas. Vadinasi, laiptuotojo bangolaidžio judesys yra tolygiausias, palyginti su kitų nagrinėtų formų bangolaidžių judesiais. Nors į eksponentę panašios formos paviršius, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, didžiausio ir mažiausio greičio skirtumas yra didžiausias (0,19 mm/s), jo virpesių amplitudė esant toms pačioms kraštinėms sąlygoms yra didžiausia (0,65 mm/s), palyginti su kitų nagrinėtų formų paviršių virpesių amplitudėmis. Mažiausias greičio skirtumas, kaip minėta prieš tai, yra esant laiptuotajam bangolaidžiui (0,06 mm/s), tačiau amplitudė yra tik 0,23 mm/s. Dėl šios priežasties tolesniuose tyrimuose sujungus dvi formas – laiptuotąją bei panašią į eksponentę – sukurtas specialiosios formos bangolaidis, kuris gali būti vadinamas laiptuotuoju-eksponentiniu bangolaidžiu.

3. EKSPERIMENTINIAI PJEZOELEKTRINIO SMŪGINIO ENERGIJOS SURINKIMO PRIETAISO TYRIMAI

3.1. Eksperimentiniai mechaninio smūgio tyrimai

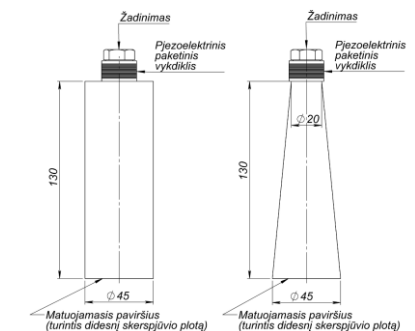
Siekiant nustatyti dinaminis mechaninio smūgio parametrus, teorinių tyrimų (2.2 poskyris) pagrindu atlikti eksperimentiniai mechaninio smūgio

tyrimai. Eksperimentinio tyrimo rezultatai atitinka teorinių tyrimų rezultatus. Tai parodo, jog smūgio parametrai labai priklauso nuo sąveikaujančių medžiagų. Taigi galima patvirtinti faktą, kad taikant mechaninį smūgį yra labai svarbu priderinti kontaktuojančių paviršių medžiagas norint gauti tam tikros amplitudės ir trukmės smūgį.

3.2. Eksperimentiniai specialiosios formos bangolaidžių tyrimai taikant harmoninį žadinimą ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą

Siekiant pagrįsti teorinių tyrimų rezultatus, t. y. kad bangolaidžio forma turi įtaką jo paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesiams, buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai taikant kelias skirtingas metodikas – impedanso, lazerinės vibrometrijos ir holografinių matavimų standus.

Pirmiausia atlikti dviejų bangolaidžių (*A* ir *B* tipo) su tuo pačiu pjezoelektriniu paketiniu vykdikliu (sudarytu iš devyniolikos $23 \times 13 \times 0,5$ mm pjezoelektrinių žiedų), kuris veikia kaip harmoninių virpesių generatorius ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą, dažninių amplitudės charakteristikų matavimai naudojant „Wayne Kerr 6500“ impedanso analizatorių. Principinė *A* ir *B* tipo bangolaidžių (atitinkamai cilindro ir kūgio formos) schema, kurioje nurodyti geometriniai matmenys ir pažymėtos žadinimo bei matavimo vietos, pateikta 3.1 pav.

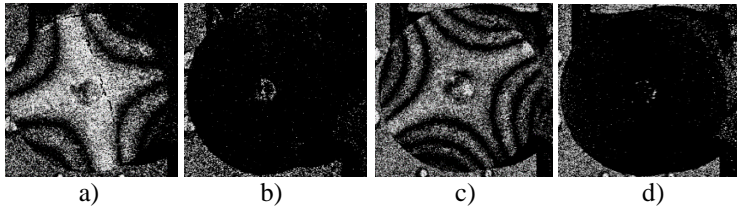


3.1 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudojamų bangolaidžių principinė schema: kairėje pusėje – *A* tipo, dešinėje – *B* tipo bangolaidis

Tyrimai parodė, jog naudojant pjezoelektrinį paketinį vykdiklį *A* tipo rezonatoriaus išilginių virpesių rezonansinis dažnis yra 18,1 kHz, *B* tipo rezonatoriaus – 15,6 kHz.

Paviršiaus visų taškų sinfaziškam-tolygiam judėjimui nustatyti atlikti holografiniai matavimai. Šių matavimų metu abiejų tipų bangolaidžiai įtvirtinti jų masės centre, o harmoninis žadinimas generuotas ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą, panaudojant tą patį pjezoelektrinį paketinį vykdiklį. Paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, hologramos, gautos esant 60,55 kHz ir 17,9 kHz

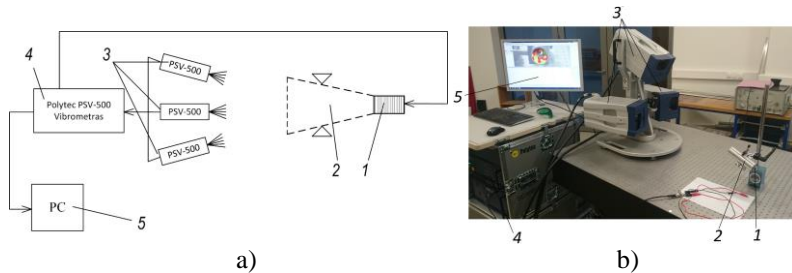
žadavimo dažniams, kai bangolaidis *A* tipo, ir esant 43,56 kHz ir 15,5 kHz žadavimo dažniams, kai bangolaidis *B* tipo, pateiktos 3.2 pav.



3.2 pav. Paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, hologramos esant: a) *A* tipo (cilindriniam) bangolaidžiui, žadavimo dažnis 60,55 kHz; b) *A* tipo (cilindriniam) bangolaidžiui, žadavimo dažnis – 17,9 kHz; c) *B* tipo (kūginiam) bangolaidžiui, žadavimo dažnis – 43,56 kHz; d) *B* tipo (kūginiam) bangolaidžiui, žadavimo dažnis – 15,5 kHz

Kaip matoma iš šių hologramų, cilindrinio bangolaidžio paviršius, turintis didesnę skerspjūvio plotą, juda tolygiai, kai žadavimo dažnis yra 17,9 kHz, o kūginio bangolaidžio paviršius tolygiai juda tada, kai žadavimo dažnis yra 15,5 kHz. Šie rezultatai atitinka teorinių tyrimų ir impedanso matavimų rezultatus.

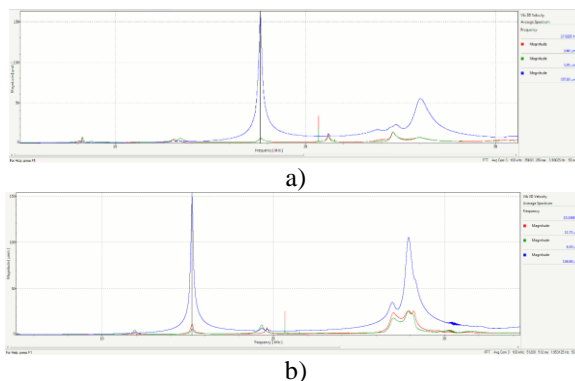
Siekiant patvirtinti gautus rezultatus, tie patys bangolaidžiai (*A* bei *B* tipo) ištirti naudojant 3D lazerinės vibrometrijos matavimo stendą. Eksperimento schema ir stendo vaizdas pateikti 3.3 pav.



3.3 pav. Eksperimentinis bangolaidžių paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, judėjimo tyrimas: a) principinė schema; b) tyrimo stendo vaizdas: 1 – pjezoelektrinis pakietinis vykdyklis; 2 – bangolaidis; 3 – lazerinės skenavimo galvos; 4 – lazerinis vibrometras; 5 – kompiuteris

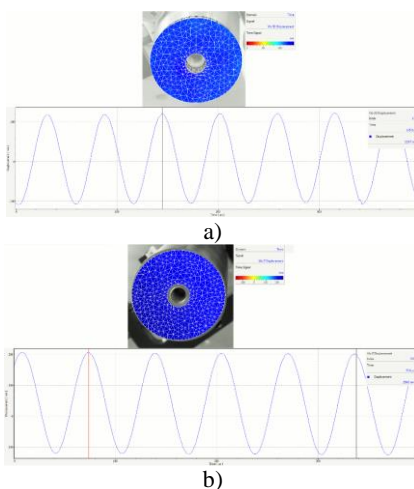
Atliekant šiuos tyrimus abiejų tipų bangolaidžiai 2 buvo žadinami tuo pačiu periodinių virpesių pakietiniu žadavimo signalu su pjezoelektriniu pakietiniu vykdykliu 1 ant paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą. Paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, erdvinis judesys (x , y , z koordinatėmis) matuojamas trimis lazerinio skenavimo galvomis 3 („Polytec PSV-500“) ir lazeriniu dopleriniu vibrometru 4 (3D „Polytec PSV-500“). Duomenims surinkti ir analizuoti naudojamas kompiuteris 5.

Gauti rezultatai – *A* bei *B* tipo bangolaidžių dažninės amplitudės charakteristikos – pateikti 3.4 pav.



3.4 pav. Dažninės amplitudės charakteristikos: a) *A* tipo bangolaidžio; b) *B* tipo bangolaidžio

Kaip matoma iš šių rezultatų, *A* ir *B* tipo bangolaidžių paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesių amplitudė yra didžiausia, kai žadinimo dažniai yra atitinkamai 17,63 kHz bei 15,25 kHz. Dėl šios priežasties 3.5 pav. pateikti paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, poslinkiai esant prieš tai nurodytiems dažniams ir tai pačiai žadinimo amplitudei ($U_{p-p} = 5$ V).



3.5 pav. Bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesiai: a) *A* tipo bangolaidis; b) *B* tipo bangolaidis

Kaip matyti iš šių rezultatų, *B* tipo bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesių amplitudė yra 1,72 karto didesnė už *A* tipo bangolaidžio paviršiaus virpesių amplitudę, kai įtvirtinimo ir žadinimo sąlygos yra vienodos.

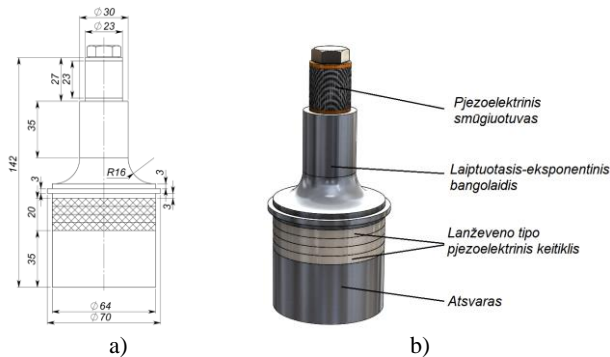
Verta paminėti, kad, nepriklausomai nuo taikyto tyrimų metodo, visais atvejais bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesių amplitudė yra didesnė, kai bangolaidis yra ne cilindro formos, vadinasi, pjezoelektriniame smūginiame energijos surinkimo prietaise esančio bangolaidžio geometrinė forma turi didelę įtaką ir turi būti parenkama siekiant didžiausios virpesių amplitudės ir reikiamo rezonansinio dažnio.

3.3. Eksperimentiniai ultragarsinio variklio valdymo tyrimai

Atlikus eksperimentinius pjezoelektrinės medžiagos po smūgio reiškinio generuojamos įtampos tyrimus nustatyta, kad minkšta pjezoelektrinė medžiaga PZT-5A generuoja apytiksliai 1,4 karto didesnę įtampą negu kieta PZT-4, kai smūgio judesio kiekis yra tas pats. Dėl to tolesniuose tyrimuose kuriamame pjezoelektriniame energijos surinkimo prietaise naudojama PZT-5A pjezoelektrinė medžiaga.

3.3.1. Pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso, generuojančio slopstančiųjų virpesių signalą, konstrukcija

Eksperimentiniuose tyrimuose naudojamas ultragarsinis variklis USM-50-3 turi 42,6 kHz darbinį dažnį, dėl to suprojektuotas ir pagamintas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas (jo brėžinys bei kompiuterinis 3D modelis pateikti 3.6 pav.), turintis 21,1 kHz išilginės virpesių modos rezonansinį dažnį ir laiptuotąji-ekspONENTINĮ bangolaidį.



3.6 pav. Pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas: a) brėžinys; b) kompiuterinis 3D modelis

Laiptuotoji-ekspONENTINĖ bangolaidžio forma parinkta dėl teorinių tyrimų rezultatų: nustatyta, kad laiptuotojo bangolaidžio paviršius, turintis didesnę

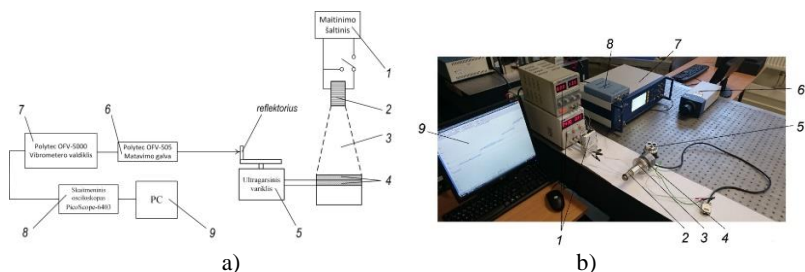
skerspjūvio plotą, juda tolygiausiai, o eksponentinio bangolaidžio paviršius turi didžiausią virpesių amplitudę, palyginti su nagrinėtais. 21,1 kHz rezonansinis dažnis parinktas vadovaujantis prielaida, kad šis dažnis yra artimas ultragarsinio variklio USM-50-3 darbinio dažnio subharmonikai.

Smūgiui generuoti naudojamas pjezoelektrinis smūgiuotuvas, sudarytas iš 46 pjezoelektrinių žiedų (matmenys – $\varnothing 23 \times \varnothing 13 \times 0,5$ mm, medžiaga – PZT-5A, suminis talpis – 260 nF). Bendroju atveju toks pjezoelektrinis smūgiuotuvas gali būti įkraunamas panaudojant alternatyviosios energijos šaltinį, pvz., saulės elementus ar fotoelementus, ir tuomet, trumpai sujungus smūgiuotuvo polius, gaunamas smūgio reiškinys.

Mechaninei energijai versti elektrine energija naudojamas Lanževano tipo pjezoelektrinis keitiklis, sudarytas iš 4 pjezoelektrinių žiedų (medžiaga – PZT-5A, suminis talpis – 6,56 nF). Kaip matyti brėžinyje (3.6 pav.), šio keitiklio geometriniai matmenys atitinka bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, matmenis, todėl smūgio energija visu paviršiumi perduodama keitikliui – taip generuojama didžiausia įtampa.

3.3.2. Eksperimentiniai ultragarsinio variklio judesio tyrimai panaudojant pjezoelektrinį smūginį energijos surinkimo prietaisą

Siekiant ištirti pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso tinkamumą ultragarsiniam varikliui valdyti, atliktas eksperimentinis tyrimas. Jo principinė schema ir stendo vaizdas pateikti 3.7 pav.

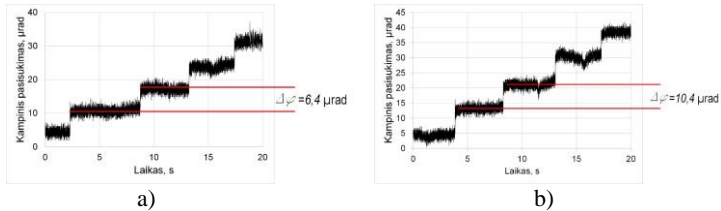


3.7 pav. Eksperimentinis pjezoelektrinio energijos surinkimo prietaiso tyrimas: a) schema; b) stendo vaizdas: 1 – maitinimo šaltinis; 2 – smūgio generatorius; 3 – laiptuotasis-eksponentinis bangolaidis; 4 – Lanževano tipo pjezoelektrinis keitiklis; 5 – ultragarsinis variklis; 6, 7 – lazerinis doplerinis vibrometras; 8 – skaitmeninis osciloskopas; 9 – kompiuteris

Šio tyrimo metu pjezoelektrinis smūgiuotuvas 2 (paketinis pjezoelektrinis vykdiklis, medžiaga – PZT-5A, suminis talpis – 260 nF) įkraunamas maitinimo šaltiniu 1 („Mastech HY5003“ su laboratoriniu įtampos stiprintuvu) intervale 315–470 V. Įkrovus smūgiuotuvą jo poliai trumpai sujungiami ir taip sugeneruoto smūgio energija per laiptuotąjį-eksponentinį bangolaidį 3 perduodama Lanževano tipo pjezoelektriniam keitikliui 4. Šio keitiklio generuojamas slopstančiųjų

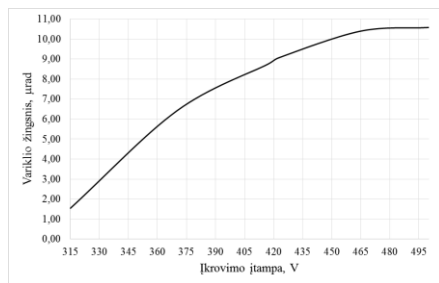
virpesių tipo elektrinis signalas tiesiogiai perduodamas pjezoelektriniam varikliui 5 (USM-50-3). Variklio judesys matuojamas lazeriniu dopleriniu vibrometru 6, 7 („Polytec OFV-50000-505“); duomenys surenkami ir analizuojami panaudojant skaitmeninį osciloskopą 8 („PicoScope-6403“) ir kompiuterį 9.

Tyrimo rezultatai – ultragarsinio variklio judesys – žingsniai, kai smūgiuotuvą įkraunamas 370 V bei 470 V įtampa, – pateikti 3.8 pav.



3.8 pav. Ultragarsinio variklio judesys – žingsniai: a) kai smūgiuotuvą įkrautas 370 V įtampa; b) kai smūgiuotuvą įkrautas 470 V įtampa

Kaip matoma iš 3.8 pav., kuo didesnė smūgiuotuvo įkrovimo įtampa, tuo didesnis variklio žingsnis. Mažiausias užfiksuotas variklio žingsnis – 1,55 μrad – buvo esant 315 V smūgiuotuvo įkrovimo įtampai, o didžiausias – 10,4 μrad – esant 470V smūgiuotuvo įkrovimo įtampai. 3.9 pav. pateikta variklio žingsnio dydžio priklausomybė nuo smūgiuotuvo įkrovimo įtampos, kuria naudojantis galima parinkti reikiamą smūgiuotuvo įkrovimo įtampą pagal norimą gauti variklio žingsnį.

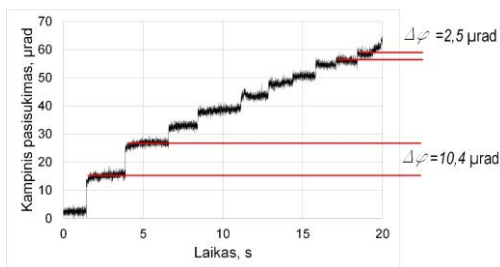


3.9 pav. Variklio žingsnio dydžio priklausomybė nuo smūgiuotuvo įkrovimo įtampos

3.3.3. Eksperimentiniai pjezoelektrinio smūgiuotuvo maitinimo grandinės tyrimai panaudojant papildomą kondensatorių

Kad pjezoelektrinio smūgiuotuvo nereikėtų įkrauti kiekvieną kartą, kai norima gauti ultragarsinio variklio žingsnį, pasiūlyta ir ištirta maitinimo grandinės schema, turinti papildomą kondensatorių tarp pjezoelektrinio smūgiuotuvo ir maitinimo šaltinio. Eksperimento metu nustatyta, kad taip, kondensatorių įkrovus

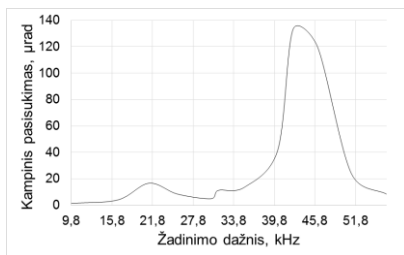
vieną kartą, galima generuoti iki trisdešimt variklio žingsnių. Eksperimentas parodė, jog, papildomą kondensatorių įkrovus 470 V įtampa, didžiausias buvo pirmasis žingsnis; žingsnių dydis mažai kito iki dvidešimt pirmojo ir apytiksliai buvo lygus 10,4 μ rad; mažiausias buvo trisdešimtas žingsnis – \sim 2,5 μ rad. 3.10 pav. pateikti eksperimento rezultatai – dešimt paskutinių ultragarsinio variklio žingsnių iš trisdešimt generuojamų.



3.10 pav. Dešimt paskutinių ultragarsinio variklio žingsnių iš trisdešimt generuojamų

3.4. Eksperimentiniai variklio judesio skyros priklausomybės nuo slopstančiųjų virpesių signalo tyrimai

Siekiant nustatyti variklio žingsnio dydžio priklausomybę nuo slopstančiųjų virpesių signalo parametrų – amplitudės ir dažnio, – atlikti eksperimentiniai ultragarsinio variklio USM-50-3 (darbinis dažnis – 42,6 kHz) judesio skyros priklausomybės nuo slopstančiųjų virpesių signalo tyrimai. Šių tyrimų metu slopstančiųjų virpesių signalas buvo generuojamas signalų generatoriumi, o variklio judesys – žingsniai buvo matuojami lazeriniu dopleriniu vibrometru. 3.11 pav. pateikti eksperimento rezultatai – ultragarsinio variklio žingsnio dydžio priklausomybė nuo slopstančiųjų virpesių signalo dažnio, kai įtamos amplitudė yra pastovi ir lygi 150 V.



3.11 pav. Ultragarsinio variklio žingsnio dydžio priklausomybė nuo slopstančiųjų virpesių signalo dažnio, kai įtamos amplitudė yra 150 V

Iš gautų rezultatų (3.11 pav.) matyti, kad variklio žingsnis padidėja esant 21,3 kHz slopstančiųjų virpesių signalo dažniui, kuris yra ultragarsinio variklio darbinio dažnio (42,6 kHz) subharmonika ir yra lygus 16,7 μ rad. Be šio padidėjimo, aiškiai matomas kitas didelis variklio žingsnis, lygus 133,3 μ rad, kai žadinimo dažnis atitinka variklio darbinį dažnį – 42,6 kHz. Šie rezultatai parodo, jog norint gauti didžiausią variklio žingsnį nuo vieno smūgio reikia turėti smūginį energijos surinkimo prietaisą, kurio išilginės virpesių modos rezonansinis dažnis sutaptų su ultragarsinio variklio darbinio dažniu. Jei užtenka gauti mažesnę variklio žingsnį, galima naudoti smūginį energijos surinkimo prietaisą, kurio išilginės virpesių modos rezonansinis dažnis yra valdomo ultragarsinio variklio darbinio dažnio subharmonika.

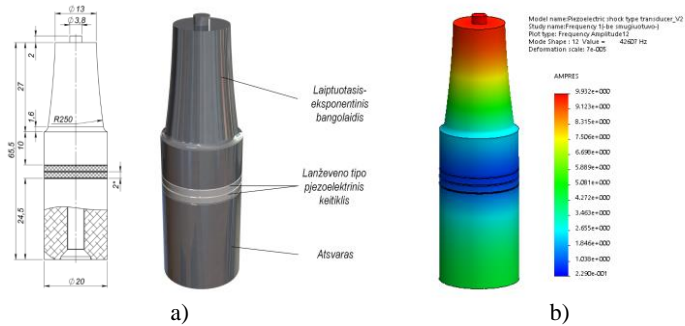
4. ENERGIJOS SURINKIMO PRIETAISO KONKREČIAI ULTRAGARSINEI PAVARAI VALDYTI PROJEKTAVIMO METODOLOGIJA

Kadangi ankstesni tyrimai parodė, jog norint gauti didžiausią variklio žingsnį pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso išilginės virpesių modos rezonansinis dažnis turi sutapti su norimo valdyti ultragarsinio variklio darbinio dažniu, šiame skyriuje pateikiama metodologija, kurią taikant galima suprojektuoti reikiamo išilginės virpesių modos rezonansinio dažnio pjezoelektrinį smūginį energijos surinkimo prietaisą, turintį mechaninį smūgiuotuvą. Toks energijos surinkimo prietaisas gali būti naudojamas bet kokioje aplinkoje, kurioje gali būti panaudota žmogaus jėga, ir jam nereikia jokių – nei tradicinių, nei alternatyviųjų – energijos šaltinių.

4.1. Smūginio energijos surinkimo prietaiso konstrukcijos projektavimas ir teoriniai tyrimai

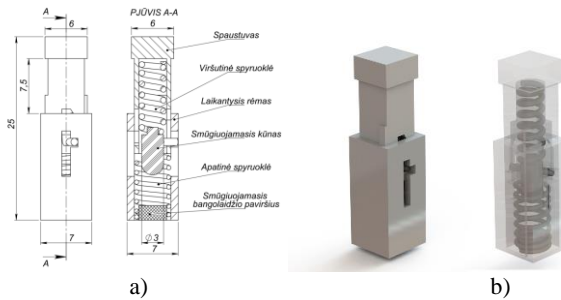
Teoriniai tyrimai padalyti į dvi dalis: pirmoje dalyje nagrinėjamas tik pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas be smūgiuotuvo, antroje – tik smūgiuotuvai.

Suprojektuotas smūginis energijos surinkimo prietaisas, turintis laiptuotąjį-eksponentinį bangolaidį ir Lanževano tipo pjezoelektrinį keitiklį, sudarytą iš 2 PZT-5A pjezoelektrinių žiedų, kurių paviršiaus plotas atitinka bangolaidžio plotą, turintį didesnę skerspjūvio plotą. Pasinaudojant „Solidworks“ dažninės analizės programų paketu nustatytas jo išilginės virpesių modos rezonansinis dažnis – 42,604 kHz. Suprojektuoto naujo pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso brėžinys, 3D modelio vaizdas ir modeliavimo rezultatai – poslinkiai esant išilginės virpesių modos rezonansiniam dažniui – pateikti 4.1 pav.



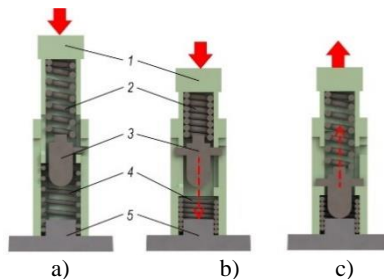
4.1 pav. Pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas be mechaninio smūgiuotuvo: a) brėžinys ir 3D modelio vaizdas; b) poslinkiai esant rezonansiniam išilginės virpesių modos dažniui

Norint turėti smūgiuotuvą, kuris nebūtų priklausomas nuo jokių – nei tradicinių, nei alternatyviųjų – energijos šaltinių, suprojektuotas mechaninis smūgiuotuvas, naudojantis žmogaus raumenų – paspaudimo pirštu – jėgą. Šio smūgiuotuvo brėžinys ir 3D modelio vaizdas pateikti 4.2 pav.



4.2 pav. Mechaninis smūgiuotuvas: a) brėžinys; b) 3D modelio vaizdas

Toks mechaninis smūgiuotuvas turi dvi spyruokles, smūgiuojamąjį kūną, laikantįjį rėmą bei spaustuvą. Veikimo principo iliustracija pateikta 4.3 pav.



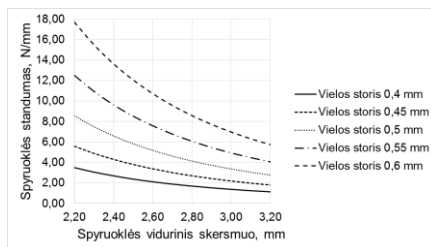
4.3 pav. Mechaninio smūgiuotuvo veikimo principo iliustracija: a) pradinė būseną; b) smūgio pradžios būseną; c) būseną po smūgio. Čia 1 – spaustuvus, 2 – viršutinė spyruoklė, 3 – smūgiuojamasis kūnas, 4 – apatinė spyruoklė, 5 – smūgiuojamasis paviršius

Veikimo principas: esant pradinėi būsenai (4.4 pav., a) spaustuvus 1 žmogaus pirštu spaudžiamas tol, kol viršutinė spyruoklė susispaudžia visiškai, taip sugenerodama didžiausią energiją. Tuomet spaustuvus nuožulna nustumia smūgiuojamąjį kūną 3 ir taip sugeneruojamas smūgis į bangolaidžio smūgiuojamąjį paviršius 5 (4.4 pav., b). Po smūgio apatinė spyruoklė 4, kuri šiuo metu būna visiškai suspausta spaustuvo korpuso kraštine (4.4 pav., c), priverčia smūgiuojamąjį kūną grįžti į pradinę padėtį.

Tokio smūgiuotuvo smūgio parametrai labai priklauso nuo medžiagų, naudojamų tiek smūgiuojamajame kūne, tiek smūgiuojamajame paviršiuje, ir labiausiai nuo viršutinės spyruoklės parametrų.

Dėl to, kad ultragarsinis variklis generuoja didžiausią žingsnį, kai žadinimo signalo dažnis atitinka variklio darbinį dažnį, smūgiuotuvus turėtų generuoti slopstančiųjų virpesių signalą, kurio periodas apytiksliai būtų lygus 23,5 μ s, tai atitinka 42,6 kHz dažnį. Dėl šios priežasties atlikti trys teoriniai tyrimai, o naudojantis gautais rezultatais galima parinkti reikiamų parametrų viršutinę spyruoklę.

Pirmiausia, atsižvelgiant į paties smūgiuotuvo geometrinius matmenis ir žinant didžiausius bei mažiausius galimus viršutinės spyruoklės matmenis, nustatyta spyruoklės standumo priklausomybė nuo vidurinio spyruoklės skersmens. Ši priklausomybė, kai spyruoklės vielos storis yra 0,4, 0,45, 0,5, 0,55 bei 0,6 mm, pateikta 4.4 pav.

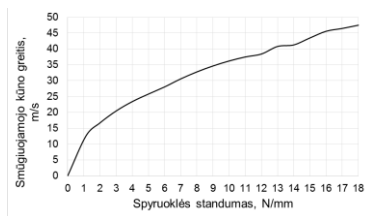


4.4 pav. Spyruoklės standumo priklausomybė nuo spyruoklės vidurinio skersmens

Kaip matoma iš pateiktų rezultatų, mažiausias galimas spyruoklės standumas – 1,14 N/mm – yra tada, kai viršutinės spyruoklės vielos storis yra 0,4 mm, o vidurinis skersmuo – 3,2 mm. Didžiausias galimas spyruoklės standumas – 17,71 N/mm – yra tada, kai vielos storis 0,6 mm, o vidurinis spyruoklės skersmuo – 2,2 mm.

Antrojo teorinio tyrimo metu pasinaudojant „SolidWorks“ judesio analizės programine įranga nustatyta suprojektuoto mechaninio smūgiuotuvo

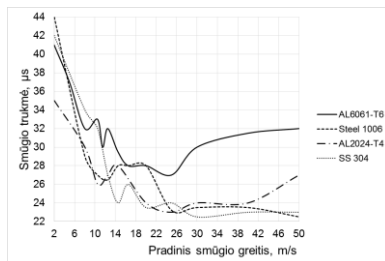
smūgiuojamojo kūno greičio priklausomybė nuo viršutinės spyruoklės standumo pateikta 4.5 pav.



4.5 pav. Mechaninio smūgiuotuvo smūgiuojamojo kūno greičio priklausomybė nuo viršutinės spyruoklės standumo

Kaip matoma iš pateiktų rezultatų, mažiausias galimas smūgiuojamojo kūno greitis – 12,5 m/s – yra tada, kai spyruoklės standumas lygus 1,14 N/mm, didžiausias greitis – 47,5 m/s – yra tada, kai spyruoklės standumas – 17,71 N/mm. Naudojantis 4.4 bei 4.5 pav. pateiktais rezultatais, galima nustatyti, kokio greičio smūgį generuoja skirtingų geometrinių matmenų viršutinė spyruoklė.

Siekiant nustatyti, kokius smūgio parametrus generuoja skirtingų matmenų viršutinė spyruoklė, pasinaudojant „Ansys Explicit Dynamics“ programine įranga atliktas trečiasis teorinis tyrimas. Gauti rezultatai – sugeneruoto smūgio trukmės priklausomybė nuo pradinio smūgio greičio esant skirtingų medžiagų (AL6061-T6, „Steel 1006“, AL2024-T4 bei SS304) smūgiuojamajam paviršiui, kai smūgiuojamasis kūnas pagamintas iš plieno „Steel 1006“, – pateikti 4.6 pav.

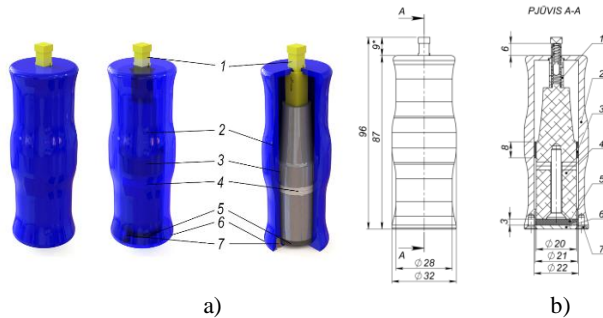


4.6 pav. Sugeneruoto smūgio trukmės priklausomybė nuo pradinio smūgio greičio esant skirtingoms smūgiuojamojo kūno medžiagoms ir pradiniam smūgio greičiui intervale nuo 2 iki 50 m/s

Iš šių rezultatų matyti, kad norima sugeneruoto smūgio trukmė – 23,5 μ s – yra keletą kartų. Šiuo atveju pasirenkama 4 N/mm standumo spyruoklė, kurios vielos storis yra 0,5 mm, o vidurinis skersmuo – 2,85 mm, todėl vidinis spyruoklės skersmuo yra 2,35 mm, o išorinis – 3,35 mm. Kaip bangolaidžio medžiaga pasirenkama AL2024-T4.

Naudojantis prieš tai pateiktu metodologijos pavyzdžiu, galima nustatyti reikiamos spyruoklės parametrus, atsižvelgiant į norimą generuoti smūgio trukmę ir į norimą valdyti ultragarsinį variklį.

Kad žmogus galėtų patogiai naudoti pjezoelektrinį smūginį energijos surinkimo prietaisą, suprojektuotas ergonominis plastikinis rėmas. Jo 3D modelio vaizdas su pjezoelektriniu smūginio energijos surinkimo prietaisu ir mechaniniu smūgiuotuvu bei brėžinys pateikti 4.7 pav.



4.7 pav. Pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas su ergonominiu rėmu ir mechaniniu smūgiuotuvu: a) 3D modelio vaizdas; b) brėžinys: 1 – smūgiuotuvas, 2 – plastikinis rėmas; 3 – guminė įvorė; 4 – pjezoelektrinis keitiklis; 5 – guminis padas; 6 – plastikinis dangtelis; 7 – įveržimo sraigtais

Tokių matmenų korpusas leidžia pjezoelektrinį smūginį energijos surinkimo prietaisą lengvai paimti ranka ir valdyti ultragarsinį variklį išvengiant bet kokių – tradicinių bei alternatyviųjų – energijos šaltinių naudojimo.

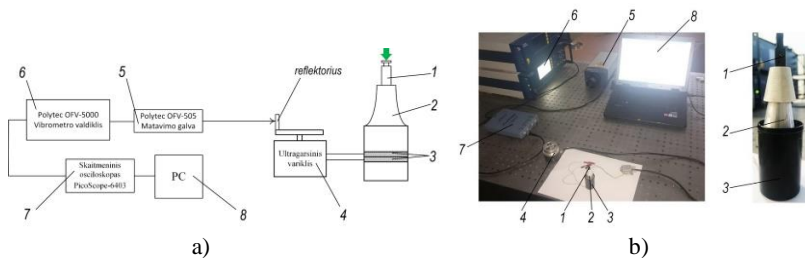
4.2. Eksperimentiniai pjezoelektrinio energijos surinkimo prietaiso tyrimai

Siekiant įsitikinti anksčiau aprašytų teorinių tyrimų rezultatų patikimumu ir patvirtinti siūlomos metodikos tinkamumą, atlikti eksperimentiniai suprojektuoto pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso tyrimai.

Pirmiausia pagamintas teoriniais tyrimais gautų geometrinių matmenų pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso prototipas ir panaudojant impedanso analizatorių „Wayne Kerr 6500“ nustatytas išilginių virpesių modos rezonansinis dažnis, apytiksliai lygus 42,6 kHz.

Atlikus vienu mechaniniu smūgiu generuojamos įtampos tyrimus nustatyta, jog suprojektuoto smūginio pjezoelektrinio energijos surinkimo įtaiso generuojamo slopstančiųjų virpesių signalo amplitudė yra apytiksliai lygi 216 V, o dažnis – 41,6 kHz.

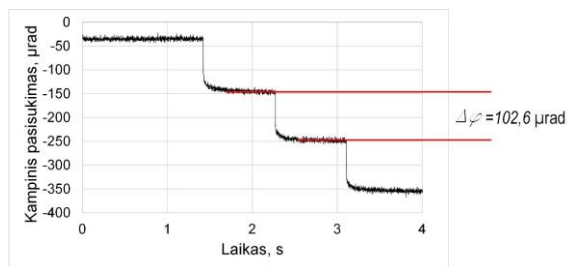
Toliau atliktas šio prietaiso tinkamumo ultragarsiniam varikliui USM-50-3 valdyti ir generuojamos judesio skyros tyrimas (tyrimų schema ir stendo vaizdas pateikti 4.8 pav.).



4.8 pav. Pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas su ergonominiu rėmu ir mechaniniu smūgiuotuuvu: a) 3D modelio vaizdas; b) brėžinys: 1 – smūgiuotavas; 2 – plastikinis rėmas; 3 – guminė įvorė; 4 – pjezoelektrinis keitiklis; 5 – guminis padas; 6 – plastikinis dangtelis; 7 – įveržimo sraigtais

Atliekant šiuos eksperimentinius tyrimus žmogus spaudžia mechaninio smūgiuotuvo 1 spaustuvą ir taip sugeneruojamas mechaninis smūgis. Jo energija per laiptuotąjį-eksponentinį bangolaidį 2 perduodama Lanževano tipo pjezoelektriniam keitikliui 3. Iš čia generuojamas slopančiųjų virpesių signalas tiesiogiai perduodamas ultragarsiniam varikliui 5 (USM-50-3), o jo judesys – žingsniai stebimi lazeriniu dopleriniu vibrometru 5, 6 („Polytec OFV-5000/505“). Duomenys surenkami ir analizuojami skaitmeniniu oscilografu 7 („PicoScope-6403“) ir kompiuteriu 8.

Eksperimento rezultatai – ultragarsinio variklio judesys – žingsniai esant trims mechaninio smūgiuotuvo paspaudimams – pateikti 4.9 pav.



4.9 pav. Ultragarsinio variklio judesys – žingsniai esant trims mechaninio smūgiuotuvo paspaudimams

Kaip matyti iš pateiktų rezultatų, suprojektuoto pjezoelektrinio energijos surinkimo prietaiso sugeneruotas vienetinis slopančiųjų virpesių tipo elektrinis signalas pasuka USM-50-3 ultragarsinį variklį didžiausiu apytiksliai 102,6 μ rad kampu. Norint mažesnio variklio judesio nuo vieno paspaudimo, galima į elektrinę grandinę tarp Lanževano tipo pjezoelektrinio keitiklio ir ultragarsinio variklio jungti potenciometrą, kaip įtampos daliklį, arba papildomą nuosekliai prijungtą kondensatorių.

4.3. Pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso sukeliama triukšmo lygio matavimas

„Bruel and Kjaer“ garso lygio matuokliu išmatavus garso slėgio lygį, remiantis LST EN ISO 1102:2010-09 standartu nustatyta, kad pjezoelektrinio smūginio energijos surinkimo prietaiso veikimo metu didžiausias pikinis garso slėgio lygis $L_{Apk}=100,2$ dB ir ekvivalentinis A svertinis garso slėgio lygis $L_{Aeq}=63,8$ dB neviršija standarte numatytų didžiausių leistinų verčių, todėl toks įrenginys gali būti naudojamas bet kokioje aplinkoje, kurioje yra žmogus.

IŠVADOS

1. Literatūros apie tradicinius energijos surinkimo prietaisus apžvalga atskleidė galimybę padidinti smūgiu sužadinamos energijos surinkimo technikos, skirtos ultragarsinio dažnio slopstančiųjų virpesių tipo elektriniam signalui generuoti, efektyvumą.
2. Suprojektuotas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas, sudarytas iš mechaninio smūgio generatoriaus, specialiosios formos bangolaidžio ir pjezoelektrinio keitiklio. Modeliuojant ANSYS 17.1 programine įranga nustatyta, jog į eksponentę panašios formos bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesių amplitudė yra 3,8 karto didesnė negu cilindrinio, o laiptuotojo bangolaidžio paviršius tolygiausiai juda, kai vyksta toks pat smūginis žadinimas ant paviršiaus, turinčio mažesnę skerspjūvio plotą. Bangolaidžių su smūginio žadinimo teorinis tyrimas parodė, jog didžiausia paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesių amplitudė yra tada, kai žadinimo impulso trukmė atitinka pusę bangolaidžio rezonansinio dažnio periodo.
3. Teorinių tyrimų rezultatai patvirtinti eksperimentiniais cilindrinio ir kintančio skerspjūvio ploto formos bangolaidžių tyrimais. Atliekant holografinius ir 3 taškų lazerinio doplerinio skenerio tyrimus nustatytos tiriamų bangolaidžių modos ir virpesių amplitudės. Nustatyta, kad kūginio bangolaidžio paviršiaus, turinčio didesnę skerspjūvio plotą, virpesių amplitudė yra nuo 1,27 iki 1,87 karto didesnė negu cilindrinio bangolaidžio. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad pjezoelektrinio smūginio energijos prietaiso generuojamo signalo įtampa gali būti padidinta iki 1,4 karto panaudojant minkštą pjezoelektrinę medžiagą (PZT-5A). Pagamintas ir iširtas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas, kurio rezonansinis dažnis 21,1 kHz, su laiptuotuoju-eksponentiniu bangolaidžiu. Eksperimentiniai tyrimai parodė, jog tokio prietaiso generuojamas slopstančiųjų virpesių subharmoninio dažnio elektrinis signalas pasuka sukamąjį ultragarsinį variklį kampu nuo 1,55 iki 10,4 μ rad.

4. Suprojektuotas ir taikant sukurtą metodologiją ištirtas naujas pjezoelektrinis smūginis energijos surinkimo prietaisas, turintis mechaninį smūgio generatorių ir 42,6 kHz rezonansinį dažnį, kuris yra artimas reikiamo valdyti ultragarsinio variklio USM-50-3 darbiniam dažniui. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad tokio pjezoelektrinio energijos surinkimo prietaiso sugeneruotas vienetinis slopstančiųjų virpesių tipo elektrinis signalas pasuka USM-50-3 ultragarsinį variklį didžiausiu apytiksliai 102,6 μ rad kampu. „Bruel and Kjaer“ garso lygio matuokliu išmatuotas triukšmo lygis ir remiantis LST LST EN ISO 1102:2010-09 standartu nustatyta, kad didžiausias pikinis garso slėgio lygis bei ekvivalentinis A svertinis garso slėgio lygis neviršija standarte numatytų didžiausių leistinų verčių.

AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Straipsniai, paskelbti „Web of Science“ duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. **Eidukynas, Darius;** Jūrėnas, Vytautas; Dragašius, Egidijus; Mystkowski, Arkadiusz. A burst type signal generator for ultrasonic motor control // Eksploatacja i niezawodność = Maintenance and reliability. Lublin: Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne. ISSN 1507-2711. 2016, vol. 18, no. 4, p. 488–491. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [IF: 1,248; AIF: 1,505; IF/AIF: 0,829; 2015; Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Contribution: 0,250]
2. **Eidukynas, Darius;** Jūrėnas, Vytautas; Mažeika, Darius. Analysis of horn type waveguide with impulse excitation // Journal of vibroengineering. Kaunas: JVE International. ISSN 1392-8716. 2016, vol. 18, iss. 3, p. 1585–1590. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Inspec; Academic Search Complete; Central & Eastern European Academic Source (Ebsco); Computers & Applied Sciences Complete; Current Abstracts; TOC Premier]. [IF: 0,384; AIF: 2,315; IF/AIF: 0,166; Q4; 2015 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Contribution: 0,333]
3. Dragašius, Egidijus; **Eidukynas, Darius;** Mažeika, Darius; Mystkowski, A.; Ažubalis, Mindaugas. The strength investigation of the composite material with implanted sensors // Mechanika / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslų akademija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1207. 2015, vol. 21, no. 1, p. 23–27. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Academic Search Complete; Inspec; Compendex; FLUIDEX; Scopus]. [IF: 0,277; AIF: 2,041; IF/AIF: 0,136; Q4; 2015 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Contribution: 0,200]

Straipsniai, paskelbti kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose

1. **Eidukynas, Darius;** Jūrėnas, Vytautas; Mažeika, Darius. R and D of system for mechanical impact generation // *Vibroengineering procedia* : international conference Vibroengineering-2014, Katowice, Poland, 13–15 October, 2014. Kaunas: JVE International. ISSN 2345-0533. 2014, vol. 3, p. 128–132. [Compendex; Academic OneFile]. [Contribution: 0,333]

Straipsniai, paskelbti konferencijų pranešimų medžiagoje

1. **Eidukynas, Darius;** Jūrėnas, Vytautas. Peculiarities of harmonic vibrations excitation with horn type waveguides // *Mechanika 2016* : proceedings of the 21st international scientific conference, 12, 13 May 2016, Kaunas University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. ISSN 1822-2951. 2016, p. 77–81. [Contribution: 0,500]
2. Mažeika, Darius; **Eidukynas, Darius;** Dragašius, Egidijus. Coefficient of restitution control using piezoelectric material // *Mechatronic systems and materials* : abstracts of the 11th international conference, MSM 2015, 7–9 July 2015, Kaunas, Lithuania / Editors: I. Skiedraitė, R. Rimašauskienė, L. Zubrickaitė, E. Drafašius. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. ISSN 1822-8283. 2015, p. 44–45. [Contribution: 0,333]

Mokslinio išradimo LR patento paraiška

„Gęstančių virpesių elektrinio signalo generatorius“ (paraiškos Nr. 2016-108)

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Darius Eidukynas gimė 1987 gruodžio 27 d. Kaune. 2006 metais baigė Kauno „Saulės“ gimnaziją ir pradėjo studijas Kauno technologijos universiteto Mechanikos ir mechatronikos fakultete. 2010 metais įgijo mechanikos inžinerijos bakalauro laipsnį, o 2012 metais – mechatronikos magistro laipsnį. 2012–2016 – Kauno technologijos universiteto Mechatronikos instituto doktorantas. Inžinerinį darbą pramonėje dirba nuo 2007 m.

RESUME

The structure of the dissertation

The thesis consists of an introduction, four sections, general conclusions, references and the author's publications list.

The first section of the thesis reviews the literature of vibrational and impact energy harvesters, mechanical impact methods, horn-type waveguides, and the techniques for ultrasonic motor control.

The second section presents the theoretical investigations. It describes the design of the piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation and explains mechanical impact modelling. Moreover, the section also presents the horn-type waveguide with harmonic and impact excitation on its surface with a smaller cross-sectional area.

In the third section, the results of theoretical investigations are verified with experimental studies of piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation, including experimental research of mechanical impact, horn-type waveguides, and ultrasonic motor control.

The fourth section presents the methodology for designing the piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation for a certain ultrasonic motor drive. This methodology is also verified by experimental investigation. At the end of the section, the noise generated by the piezoelectric impact energy harvester is evaluated according to the LST standard.

Conclusions present the results of the theoretical and experimental investigations.

The total volume of the thesis is 110 pages, including 89 figures, 12 tables, and 7 pages of appendixes.

Aim and objectives of the research

1. The aim of this research is to design and develop a piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation and adapt it for the drive of the ultrasonic motor.
2. The following objectives are set in order to reach the aim:
3. to review the literature regarding the research fields of vibrational and impact energy harvesting, mechanical impact generation methods, horn-type waveguides used as resonators, and techniques of ultrasonic motor control as well as to determine the main advantages and disadvantages of energy harvesters.
4. to design and theoretically investigate the novel piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation by modelling a mechanical impact and horn-type waveguide with harmonic and impulse excitation when it is applied on a surface with smaller cross-sectional area.

5. to experimentally investigate the piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation, including experimental research of mechanical impact, horn-type waveguides, and ultrasonic motor control.
6. to create and investigate a methodology for designing an impact energy harvester for certain ultrasonic motor drive.

Scientific novelty

- Designed a novel piezoelectric impact energy harvester, intended for high frequency burst-type signal generation using horn-type waveguide as resonator of particular frequency, which increases the amplitude of generated burst-type signal and protects the brittle piezoceramic material from breakage due to by impact.
- Designed and developed a piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation which is intended for direct control of ultrasonic motor. Therefore, such a device allows to drive and control an ultrasonic motor in environments where traditional power supplies, such as power supply or batteries are unavailable or when they are damaged.
- Horn-type waveguide was investigated in different ways – with harmonic and impulse excitation on the surface with a smaller cross-sectional area thus allowing to uniformly transmit the impact energy to piezoelectric transducer with a surface of greater cross-sectional area.
- The methodology of piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation design of certain ultrasonic motor drive was created. Experimental studies show that such a methodology works correctly and could be applied in practice.

Practical value

The piezoelectric impact energy harvester designed during this research is intended for ultrasonic frequency burst type-signal generation, which could be directly used in ultrasonic motor drive. The aforementioned piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation can operate as an alternative for ultrasonic motor drive when traditional methods, such as signal generators are unavailable or damaged. This decreases the risk of ultrasonic motor exploitation failure when traditional control systems are damaged or are unavailable in areas such as nature, space, etc. Since the presented piezoelectric impact energy harvester for burst-type signal generation can drive both rotational and linear ultrasonic motors, it allows to increase the reliability of precision positioning drive exploitation.

Research methods

The research was carried out by using theoretical and experimental methods of investigation.

Theoretical research is based on several methods – analytical and finite element methods, which were performed using ANSYS 17.1 and SolidWorks 2016 software packages.

The theoretical results were verified with experimental investigation which was carried out at Kaunas University of Technology, Institute of Mechatronics and Technological Systems Diagnostics Institute. During experimental research for measuring the surface vibrations, 1D and 3D scanning laser Doppler vibrometers (Polytec Inc.), holographic interferometry system PRISM 100 (Hytec Inc.), impedance meter Wayne Kerr 6500B and high frequency accelerometers (Bruel and Kjaer) were used. PicoScope hardware and software were used to measure and process the researched signals. The noise of piezoelectric shock-type impact energy harvester was evaluated using the sound Investigator 2260 (Bruel and Kjaer).

Research approbation

The results of the research were published in 6 scientific papers: 3 papers with impact factor, listed in the database of the Institute for Scientific Information (ISI), 1 paper is listed in other international databases, and 2 articles are published in peer-reviewed conference proceedings.

The results of this research were also presented in four international conferences: “Vibroengineering-2014”, Poland, “Mechanika 2015”, Kaunas, “Mechatronic Systems and Materials 2015”, Kaunas and “Mechanika 2016”, Kaunas.

Registered by a scientific invention patent application of the Republic of Lithuania.

UDK 621.314+681.586.773](043.3)

SL344. 2017-03-20, 2,25 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas