

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Artūras GRIGORAVIČIUS

NANOMETRINĖS SKYROS MIKRROROBOTŲ PJEZOKEITIKLIŲ SKAITINIS TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
INFORMATIKOS INŽINERIJA (07T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2014

Disertacija rengta 2010–2014 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Genadijus KULVIETIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, informatikos inžinerija – 07T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Informatikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Dalius NAVAKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, informatikos inžinerija – 07T).

Nariai:

prof. habil. dr. Rimantas BARAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, informatikos inžinerija – 07T),

doc. dr. Arnas KAČENIAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, informatikos inžinerija – 07T),

prof. habil. dr. Rimvydas SIMUTIS (Kauno technologijos universitetas, informatikos inžinerija – 07T),

prof. habil. dr. Mihails ZAKRŽEVSKIS (Rygos technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Disertacija bus ginama viešame Informatikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2015 m. sausio 9 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2014 m. gruodžio 8 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2263-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-718-5

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2014

© Artūras Grigoravičius, 2014

arturas.grigoravicius@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Artūras GRIGORAVIČIUS

**NUMERICAL MODELLING OF
PIEZOTRANSDUCERS OF MICROROBOTS
WITH NANOMETRIC RESOLUTION**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
INFORMATICS ENGINEERING (07T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2014

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2010–2014.

Supervisor

Prof Dr Habil Genadijus KULVIETIS (Vilnius Gediminas Technical University, Informatics Engineering – 07T).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Informatics Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Dalius NAVAKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Informatics Engineering – 07T).

Members:

Prof Dr Habil Rimantas BARAUSKAS (Kaunas University of Technology, Informatics Engineering – 07T),

Assoc Prof Dr Arnas KAČENIAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Habil Rimvydas SIMUTIS (Kaunas University of Technology, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Habil Mihails ZAKRŽEVSKIS (Riga Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Informatics Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a. m. on 9 January 2015**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 8 December 2014. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Internet website <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Darbo tikslas buvo sukurti nanometrines skyros mikrorobotu pjezokeitikliu skaitinius modelius, kurie leis nustatyti racionalius geometrinius parametrus bei kontaktiniu tašku judėjimo trajektorijas, naudojant automatizuota modeliavimo procesa.

Disertacijoje buvo atlikta nanometrines skyros mikrorobotu skaitinio modeliavimo darbu analize, istirti nanometrines skyros mikrorobotu skaitinio modeliavimo irankiai. Buvo sukurti ir istirti plokstuminiu bei erdviniu nanometrines skyros mikrorobotu pjezokeitikliu modeliai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, formuluojamas darbo tikslas ir uzdaviniai, pateikiami tyrimu metodai, aprasomas mokslinis darbo naujumas, bei praktine darbo vertė.

Pirmajame skyriuje, teoriniu tyrimu analizeje buvo apzvelgtos nanometrines skyros mikrorobotu pjezokeitikliu charakteristikos. Pristatytos pagrindines tyrimu kryptys, apzvelgiami Lietuvos ir uzsenio moksliniku tyrimai ir su jais susijusios problemos. Pristatytos mechanikos inžinerijos, informatikos inžinerijos mokslo kryptiu „Vibrotechnikos“ moksliniku mokyklos, bei darbo grupės.

Antrajame skyriuje suformuoti skaitinio modeliavimo tyrimu uzdaviniai. Aprasyti irankiai, metodai, kurie naudojami uzdaviniams spręsti. Pateiktas baigtiniu elementu metodo taikymas pjezokeitikliu modeliavime, racionaliu geometriniu parametru nustatymas plokstuminiuose ir erdviniuose pjezokeitikliuose, savuju formu atpažinimas naudojant parcialinius ir globalinius dominavimo koeficientus, kontaktiniu tašku elipsinio judėjimo trajektoriju tyrimo metodika. Aprasytas skaitinio modeliavimo priemoniu automatizavimo mechanizmas.

Atliekant praktinius tyrimus buvo sukurti ir istirti plokstuniniai ir erdviniai nanometrines skyros pjezokeitikliu diskretiniai modeliai, ispsresti savuju reiksmiu uzdaviniai, nustatyti pjezokeitikliu racionalus geometrinius parametrus, bei isnagrinetos parinktu kontaktiniu tašku judėjimo trajektorijos. Tyrimu rezultatai pateikti trečiame ir ketvirtame skyriuose. Darbo pabaigoje apibendrinami tyrimu rezultatai ir pateiktos galutinės išvados.

Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai: keturi – recenzuojamuose moksliniuose žurnaluose, itrauktuose į Thomson ISI (Web of Science) sąrašą, vienas – kitose duomenų bazėse, du – recenzuojamoje užsenio tarptautinės konferencijos medžiagoje. Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai Lietuvos bei kitu šaliu konferencijose.

Abstract

The aim of the research was to create the numerical models of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution, which would allow to define rational geometrical parameters and movement trajectories of the contact points, using automate process of numerical modelling.

The analysis of numerical modelling works of microrobots with nanometric resolution was performed in the dissertation, tools of numerical modelling of microrobots with nanometric resolution were investigated. The spatial and planar models of the piezotransducers of microrobots with nanometric resolution were created and explored.

The introductory chapter discusses the research problem, the relevance of the research, formulates the goal and objectives of the research, presents the methods used, and describes the scientific novelty and practical value of the work.

In the first section, in the theoretical analysis of the studies the characteristics of the piezotransducers of microrobots with nanometric resolution were reviewed. The main directions of researches were presented, Lithuanian and foreign scientific researches and related problems were overviewed. „Vibrotechnika“ scientific school and working groups in mechanical engineering and information technologies science fields were presented.

In the second section, researches of numerical modelling tasks were developed. The tools and methods that were used to solve the tasks were described. The finite element method application in modelling of piezotransducers, the establishment of rational geometrical parameters in planar and spatial piezotransducers, the recognition of eigenforms using the partial and global dominance coefficients, the research methods of the elliptical movement trajectory of the contact points were presented. The mechanism of numerical modelling tools automation was described.

The discrete models of the planar and multi-dimensional piezotransducers of microrobots with nanometric resolution were designed and investigated. The results are summarized in the third and fourth chapters and the final conclusions are given at the end of the work.

Seven articles on the topic of dissertation were published: four – in peer-reviewed scientific journals listed in the Thomson ISI (Web of Science) list, one – in other databases, two – in refereed foreign international conference materials. Three presentations were given on the topic of dissertation at conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

A – išorinių žadinimo jėgų amplitudė;

A_{ik}^n – i -tojo elemento savosios formos vektoriaus reikšmė;

a – pjezokeitiklio geometriniai parametrai;

b – plotis;

c – tampriųjų virpesių sklidimo greitis;

E – signalas;

F – pjezokeitiklio formos koeficientas;

h – aukštis/storis;

k – laisvės laipsnių skaičius mazge;

k_E – elektromechaninis koeficientas;

L – mazgų (laisvės laipsnių) skaičius modelyje;

l – ilgis;

n – lenkimo formos numeris;

m – banginis skaičius;

m_{jk}^n – virpesių dominavimo koeficientas;

R – formos vektoriaus dydis k -tajai koordinatei;

r – spindulys;

S_2 – paviršiaus plotas, kuris yra veikiamas elektros krūvio;

S_k^n – n -tojo savojo dažnio virpesių dydžiai proporcingi energijai k -tąja kryptimi;

t – laikas;

U – įtampa;
 α, β – kampai;
 γ, δ – proporcingumo koeficientai;
 ξ – poslinkiai;
 τ – virpesių dydžių proporcingų energijai dedamųjų sistemos koordinačių kryptimis koreliacija;
 ν – Puasono koeficientas;
 χ – pjezoelektrinio kūno pilna potencinė energija;
 ω – savasis dažnis;
 $[e^e]$ – dielektrinių konstantų matrica, kai yra pastovios mechaninės deformacijos;
 $[e^s]$ – dielektrinių konstantų matrica;
 $[B_u]$ – funkcijų išvestinių matrica, apibūdinanti elemento mechanines deformacijas;
 $[B_\phi]$ – funkcijų išvestinių matrica, apibūdinanti elektrinį lauką;
 $[C]$ – slopinimo matrica;
 $[c^D]$ – tamprumo matrica, kai yra pastovus elektrinės indukcijos vektorius;
 $[c^E]$ – tamprumo matrica;
 $[d]$ – medžiagos pjezoelektrinių modulių matrica;
 $[e]$ – pjezoelektrinių konstantų matrica;
 $[g]$ – pjezoelektrinė įtempimų koeficientų matrica;
 $[h]$ – pjezoelektrinė deformacijų koeficientų matrica;
 $[K]$ – standumo matrica;
 $[M]$ – masės matrica;
 $[N_u]$ – poslinkių formos funkcijų matrica;
 $[N_\phi]$ – elektrinio potencialo formos funkcijų matrica;
 $[S]$ – talpinė matrica;
 $[T]$ – elektromechaninė matrica;
 $\{\sigma\}$ – mechaninių įtempimų vektorius;
 $\{\phi\}$ – elektrinių potencialų vektorius;
 $\{D\}$ – elektrinės indukcijos vektorius;
 $\{e\}$ – mechaninių deformacijų vektorius;
 $\{E\}$ – elektrinio lauko stiprumo vektorius;
 $\{F^e\}$ – išorinių mazginių apkrovų vektorius;
 $\{P\}$ – poliarizacijos vektorius;
 $\{P_b\}$ – išorinių tūrinių apkrovų vektorius;
 $\{P_c\}$ – koncentruotų išorinių apkrovų vektorius;
 $\{P_s\}$ – išorinių paviršinių apkrovų vektorius;

$\{Q\}$ – elektrinių krūvių vektorius;

$\{u\}$ – poslinkių vektorius.

Santrumpos

BEM – baigtinių elementų metodas;

BE – baigtiniai elementai;

MEMS – makro ir mikro elektromechaninės sistemos.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	4
1. PJEZOKEITIKLIŲ SKAITINIO MODELIAVIMO DARBŲ ANALIZĖ	5
1.1. Pjezokeitiklių analizė	6
1.2. Pjezoefekto reiškinys pjezokeitiklių modeliavime	13
1.3. Pjezokeitiklių modeliavimo darbų analizė	17
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	28
2. PJEZOKEITIKLIŲ SKAITINIO MODELIAVIMO METODŲ TYRIMAS	29
2.1. Pjezokeitiklių skaitinio modeliavimo uždaviniai.....	30
2.1.1. Racionalių geometrinių parametrų optimizacijos uždavinys	30
2.1.2. Savųjų formų atpažinimo uždavinys.....	31

2.1.3. Elektrodo konfiguracijos uždavinys	31
2.1.4. Elipsinių trajektorijų formavimo uždavinys	33
2.2. Pjezokeitiklių modeliavimas naudojant baigtinių elementų metodą	33
2.3. Racionalių geometrinių parametru nustatymas pjezokeitikiuose	38
2.3.1. Plokštuminių pjezokeitiklių racionalių geometrinių parametru radimas ...	40
2.3.2. Erdvinių pjezokeitiklių racionalių geometrinių parametru radimas	40
2.4. Pjezokeitiklių savųjų formų atpažinimas naudojant dominavimo koeficientus..	41
2.4.1. Savųjų formų atpažinimas naudojant parcialinius dominavimo koeficientus	41
2.4.2. Savųjų formų atpažinimas naudojant globalinius dominavimo koeficientus	43
2.5. Pjezokeitiklių elipsinių kontaktinio taško judesio trajektorijų nustatymas.....	45
2.6. Pjezokeitiklių skaitinio modeliavimo automatizavimas	46
2.7. Antrojo skyriaus išvados	49
3. PLOKŠTUMINIŲ PJEZOKEITIKLIŲ SKAITINIAI MODELIAI	51
3.1. Stačiakampio formos pjezokeitiklių modeliavimas.....	52
3.1.1. Stačiakampio formos pjezokeitiklių savųjų reikšmių uždavinys	54
3.1.2. Stačiakampio formos pjezokeitiklių analizė esant harmoniniam žadinimui.....	59
3.2. Žiedo formos pjezokeitiklių modeliavimas	61
3.2.1. Žiedo formos pjezokeitiklių savųjų reikšmių uždavinys.....	63
3.2.2. Žiedo formos pjezokeitiklių analizė esant harmoniniam žadinimui	75
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	81
4. ERDVINIŲ PJEZOKEITIKLIŲ SKAITINIAI MODELIAI.....	83
4.1. Cilindro formos pjezokeitiklių modeliavimas	84
4.1.1. Cilindro formos pjezokeitiklių savųjų reikšmių uždavinys.....	86
4.1.2. Cilindro formos pjezokeitiklių bėgančios bangos analizė esant harmoniniam žadinimui	90
4.2. Aktyvių atramų modeliavimas	94
4.2.1. Aktyvių atramų savųjų reikšmių uždavinys.....	96
4.2.2. Aktyvių atramų analizė esant harmoniniam žadinimui.....	106
4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados	109
BENDROSIOS IŠVADOS	111
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	113
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	121
SUMMARY IN ENGLISH.....	123
PRIEDAI.....	141
A priedas. ANSYS programos bibliotekos trimačio modelio (3D) elementai ir medžiagos savybės	142
B priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje.....	144
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	153

Contents

INTRODUCTION	1
The problem of research.....	1
Topicality of the work	2
The object of research	2
The aim of the research	2
The objectives of the research	3
Methods of the research	3
Scientific novelty.....	3
Practical significance of the work	3
Defended propositions.....	4
Approval of the research results	4
The structure of the dissertation	4
1. THE ANALYSIS OF NUMERICAL MODELLING WORKS OF PIEZOTRANSDUCERS	5
1.1. The analysis of piezotransducers	6
1.2. Piezoeffect phenomenon in modelling of piezotransducers	13
1.3. The analysis of work modelling of piezotransducers	17
1.4. Conclusions of Chapter 1 and formulation of the tasks of dissertation	28
2. THE RESEARCH OF METHODS OF PIEZOTRANSDUCERS.....	29
2.1. The tasks of numerical modelling of piezotransducers	30
2.1.1. The task of optimization of rational geometric parameters.....	30

2.1.2. The task of recognition of eigenforms	31
2.1.3. The task of electrodes configuration.....	31
2.1.4. The task of elliptical trajectory formation.....	33
2.2. The finite elements method application in the modelling of piezotransducers...	33
2.3. Rational geometric parameters establishment in piezotransducers	38
2.3.1. Rational geometric parameters establishment in planar piezotransducers.....	40
2.3.2. Rational geometric parameters establishment in spatial piezotransducers.....	40
2.4. Identification of eigenforms of piezotransducers using domination coefficients	41
2.4.1. Identification of eigenforms of piezotransducers using partial domination coefficients.....	41
2.4.2. Identification of eigenforms of piezotransducers using global domination coefficients.....	43
2.5. Establishment of elliptical movement trajectories of contact point of piezotransducers	45
2.6. The automation of numerical modelling of piezotransducers.....	46
2.7. Conclusions of Chapter 2	49
3. THE NUMERICAL MODELS OF PLANAR PIEZOTRANSDUCERS	51
3.1. The modelling of rectangular-shaped piezotransducers	52
3.1.1. The task of eigenvalues of rectangular-shaped piezotransducers	54
3.1.2. The analysis of rectangular-shaped piezotransducers under harmonic excitation.....	59
3.2. The modelling of ring-shaped piezotransducers.....	61
3.2.1. The task of eigenvalues of ring-shaped piezotransducers.....	63
3.2.2. The analysis of ring-shaped piezotransducers under harmonic excitation.....	75
3.3. Conclusions of Chapter 3	81
4. THE NUMERICAL MODELS OF SPATIAL PIEZOTRANSDUCERS	83
4.1. The modelling of cylinder-shaped piezotransducers	84
4.1.1. The task of eigenvalues of cylinder-shaped piezotransducers	86
4.1.2. The analysis of cylinder-shaped piezotransducers under harmonic excitation.....	90
4.2. A The modelling of active bearings	94
4.2.1. The task of eigenvalues of active bearings	96
4.2.2. The analysis of active bearings under harmonic excitation	106
4.3. Conclusions of Chapter 4	109
GENERAL CONCLUSIONS	111
REFERENCES	113
AUTHOR'S LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	121
SUMMARY IN ENGLISH.....	123

ANNEXES	141
Annex A. The elements of library of ANSYS programme of three-dimensional (3D) model and the characteristics of the materials	142
Annex B. The co-authors agreements to present publication	144
Annex C. Copies of author scientific publications on the subject of dissertation	153

Įvadas

Problemos formulavimas

Atliekant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tyrimus, susiduriama su daugeliu mechanikos, medžiagotyros, sistemų valdymo bei informatikos problemų. Kiekviena nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tyrimų kryptis turi savo išskylančias problemas, bei uždavinius jas spręsti.

Skaitinis pjezokeitiklių modeliavimas leidžia pateikti svarbią informaciją apie tiriamo pjezokeitiklio savuosius dažnius, nustatytus geometrinius parametrus, rastą elektrodų ir žadinimo zonų konfigūraciją. Tai leidžia eksperimentinius tyrimus atlikti su jau iš anksto žinomais modelio duomenimis, mažinant bandymų skaičių, darbo resursų laiką, bei su mažesnėmis medžiagų snaudomis. Todėl yra labai svarbu surinkti kuo daugiau tikslesnės informacijos apie modelį sprendžiant tiesinius uždavinius.

Skaitinio modeliavimo eigą stengiamasi kuo daugiau automatizuoti ir standartizuoti. Įprastai nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitiniams tyrimams taikomas baigtinių elementų metodas. BEM palaikomas ir daugelyje šiuo metu naudojamų programinių paketų.

Skaitiškai modeliuojant net pakankamai nesudėtingą modelį, naudojant standartines ANSYS priemones, modeliavimo darbai gerokai užtrunka. Žmogui neturinčiam pakankamo įdirbio su programiniu paketu užtrunka reikiamų priemonių radimas įrankių medyje. Nemažai laiko užima medžiagų savybių

aprašymai, modelio braižymo darbai, tinklelio parinkimas ir t. t. Vėliau gautų skaitinio modeliavimo rezultatų atrinkimas, apdorojimas iš failų, matematinių formulių taikymas jiems. Rankinio darbo principas tiktų jei reikėtų modeliuoti kelis modelius. Tačiau norint nustatyti racionalius geometrinius parametrus, tinkamą elektrodų konfigūraciją, savuosius dažnius ir formas, kontaktinių taškų elipsines trajektorijas reikia skaitiškai ištirti kelias dešimtis modelių. Todėl toks darbo principas iš esmės netinka ir reikia ieškoti nestandartinių sprendimo būdų, t. y. kuo daugiau automatizuoti nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitinius tyrimus.

Darbo aktualumas

Plačios nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių galimybės tiksliai pozicionuoti sistemą erdvėje ir laike, slopinti vibracinį triukšmą ir generuoti varomąją jėgą seniai domina mokslininkus ir konstruktorius.

Spartus pasaulinės pramonės ir gamybos vystymasis skatina intensyvinti mokslinius tyrimus bei kurti efektyvias technologijas, lemiančias naujos produkcijos kokybę. Todėl stengiamasi kuo daugiau automatizuoti nanometrines skyros mikrorobotų skaitinio modeliavimo procesą.

Disertacijoje pasiūlytas skaitinio modeliavimo priemonių automatizavimo mechanizmas, palengvinantis nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių modeliavimą ir leidžiantis automatizuoti skaitinius tyrimus.

Darbe pateikiami nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitinio modeliavimo būdai, skaitiniams tyrimams taikomas baigtinių elementų metodas. Skaitiniai modeliai buvo naudojami sprendžiant tokius uždavinius, kaip nanometrines skyros mikrorobotų stačiakampio, žiedo ir cilindro formos pjezokeitiklių, nanometrines skyros mikrorobotų aktyvių atramų sistemų sukūrimui, randant savąsias formas, sprendžiant racionalių geometrinių parametrų nustatymo uždavinius, atliekant dinamikos tyrimus – randant kontaktinio taško judesio trajektorijos priklausomybes nuo žadinimo schemų.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitiniai modeliai.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – sukurti nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitinius modelius, kurie leis nustatyti racionalius geometrinius parametrus bei kontaktinių taškų judėjimo trajektorijas, naudojant automatizuotą modeliavimo procesą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti nanometrines skyros mikrorobotų skaitinio modeliavimo darbų analizę.
2. Parinkti nanometrines skyros mikrorobotų skaitinio modeliavimo metodus.
3. Sukurti nanometrines skyros mikrorobotų plokštuminių pjzokeitiklių skaitinius modelius.
4. Sukurti nanometrines skyros mikrorobotų erdvinių pjzokeitiklių skaitinius modelius.

Tyrimų metodika

Darbe buvo taikomi analitiniai, skaitiniai ir lyginamosios analizės metodai. Susijusių mokslinių darbų apžvalga buvo atlikta vadovaujantis literatūros sisteminės apžvalgos metodika. Nanometrines skyros mikrorobotų pjzokeitiklių dinamikos uždaviniai išspręsti baigtinių elementų metodu. Skaičiavimai buvo atlikti naudojantis baigtinių elementų metodo programiniu paketu ANSYS 10 ir autoriaus sukurtomis programomis. Apibendrinant gautus rezultatus ir pateikiant praktines rekomendacijas buvo taikomi apibendrinimo metodai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti sekantys inžinerinės informatikos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurtas skaitinio modeliavimo priemonių automatizavimo mechanizmas, palengvinantis nanometrines skyros mikrorobotų pjzokeitiklių modeliavimą ir leidžiantis automatizuoti skaitinius tyrimus.
2. Sukurti plokštuminių bei erdvinių nanometrines skyros mikrorobotų pjzokeitiklių, kurie bus taikomi kompleksinėse sistemose, skaitiniai modeliai ir racionalių geometrinių parametrų nustatymo metodika.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Nanometrines skyros mikrorobotų pjzokeitiklių skaitinai tyrimai buvo atlikti vykdant mokslininkų grupės projektą „Mechatroninių nanometrų skyros daugiamačių robotizuotų įtaisų modeliavimas ir valdymas“, 2010–2013 m. Sutarties Nr.: MIP-122/2010; MIP-075/2012. Skaitinio tyrimo rezultatai bus

panaudoti praktikoje siekiant sukurti nanometrines skyros mechatronines sistemas.

Ginamieji teiginiai

1. Kelių plokštuminių arba erdviųjų nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių sujungimas į vieną sistemą, padidina sistemos laisvės laipsnių skaičių.
2. Sukurtas skaitinio modeliavimo priemonių automatizavimas leidžia supaprastinti tyrimo procesą ir taip sutaupyti trečdalį laiko.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema atspausdinti 7 moksliniai straipsniai: keturi – recenzuojamuose moksliniuose žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI (Web of Science) sąrašą (Grigoravičius 2012; 2013a; 2013b; 2014), du – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų leidiniuose įtrauktuose į Thomson ISI (ISI Proceedings) sąrašą (Grigoravičius 2010b; 2013c), vienas – kitų tarptautinių duomenų bazių leidinyje (Grigoravičius 2010a).

Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose:

- Pranešimas tarptautinėje konferencijoje „*Proceedings of the International Conference on Applied Computer Science (ACS)*“, 2010 m. rugsėjo 15–17 d., Maltoje.
- Pranešimas 18-toje tarptautinėje konferencijoje „*Mechanika 2013*“, 2013 m. balandžio 4–5 d., Kaune.
- Pranešimas tarptautinėje konferencijoje „*Vibroengineering–2013*“, 2013 m. rugsėjo 15–17 d., Druskininkuose.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba, trys priedai. Darbo apimtis yra 139 puslapiai, neįskaitant priedų, tekste pateiktos 47 numeruotos formulės, 80 paveikslų. Rašant disertaciją buvo panaudoti 99 literatūros šaltiniai.

Pjezokeitiklių skaitinio modeliavimo darbų analizė

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitikliai užima svarbią vietą precizinėje virpesių mechanikoje ir technikoje. Jų turimos savybės daugeliu atvejų apibrėžia pagrindines pjezoelektrinių įrenginių charakteristikas: galingumą, darbinį dažnį, jautrumą bei kitas mechanines ir fizikines charakteristikas.

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitikliai, palyginti su elektromagnetiniais, hidrauliniiais, pneumatiniiais judesio keitikliais pasižymi didesniu tikslumu (0,01 μm), mažesniais geometriniais parametrais (<0,1 cm) bei trumpesniu reakcijos laiku (0,01 ms) (Isermann 2003).

Pjezokeitiklius galima būtų suskirstyti į nuolatinės, kintamos ir impulsinės srovės keitiklius. Kiekvienas pjezokeitiklis, priklausomai nuo žadinančio elektrinio signalo tipo, turi savo pritaikymo sritį, uždavinius, bei išskylančias problemas. Sinusiniu elektriniu signalu žadinamuose pjezokeitikliuose gaunami rezonansiniai virpesiai.

Šių pjezokeitiklių panaudojimo galimybės yra labai plačios, tačiau paprastai išskiriamos trys pagrindinės jų pritaikymo kryptys (Ragulskis *et al.* 1988):

- vibraciniai varikliai, kuriuose kontaktuojančios grandies judesys yra gaunamas panaudojant keitiklio rezonansinius virpesius, smūgines ir trinties jėgas;

- vibraciniai įrenginiai, kuriuose mechaninė pjezokeitiklio energija perduodama orui/skysčiui (ventiliatoriai, siurbliai);
- įrenginiai, kuriuose tiesiogiai panaudojami pjezokeitiklio rezonansiniai virpesiai.

Šiame skyriuje aptariamos pjezokeitiklių charakteristikos, geometrinių parametų įtaka nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių virpesiams, elektrodų konfigūracijos, apžvelgiami moksliniai pjezokeitiklių tyrimai ir su jais susijusios problemos.

1.1. Pjezokeitiklių analizė

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių savybės apibrėžiamos naudojant mechaninių, elektrinių laukų bei tik pjezomechaninėms struktūroms būdingas charakteristikas.

Pjezokeitikliuose žadinamų rezonansinių virpesių specifiką įtakoja visa eilė faktorių:

- fizikinės pjezokeraminės medžiagos savybės;
- poliarizacijos dydis ir kryptis;
- pjezokeitiklio geometriniai parametrai (forma, charakteringų matmenų santykis);
- žadinimo zonų konfigūracija (elektrodų topologija ir geometrinė forma);
- pjezokeitiklio tvirtinimo sąlygos;
- kraštinės sąlygos.

Bendruoju atveju pjezokeitiklio virpesių dažnio ω_k priklausomybė nuo geometrinių charakteristikų ir pjezokeramikos savybių išreiškiama taip (Джагупов 1986):

$$\omega_k = F(a, \nu) c, \quad (1.1)$$

čia F – pjezokeitiklio formos koeficientas, a – pjezokeitiklio geometriniai parametrai, ν – Puasono koeficientas, c – tampriųjų virpesių sklidimo greitis.

Geometrinių parametų įtaka nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių virpesiams panaši į bet kurios kontinuumo sistemas. Dažniausiai skirtingų geometrinių formų pjezokeitikliuose žadinami skirtingų parametų virpesiai. Nors tai ne taisyklė, pasitaiko atvejų, kai tas pačias virpesių charakteristikas galima gauti naudojant skirtingų geometrinių parametų pjezokeitiklius.

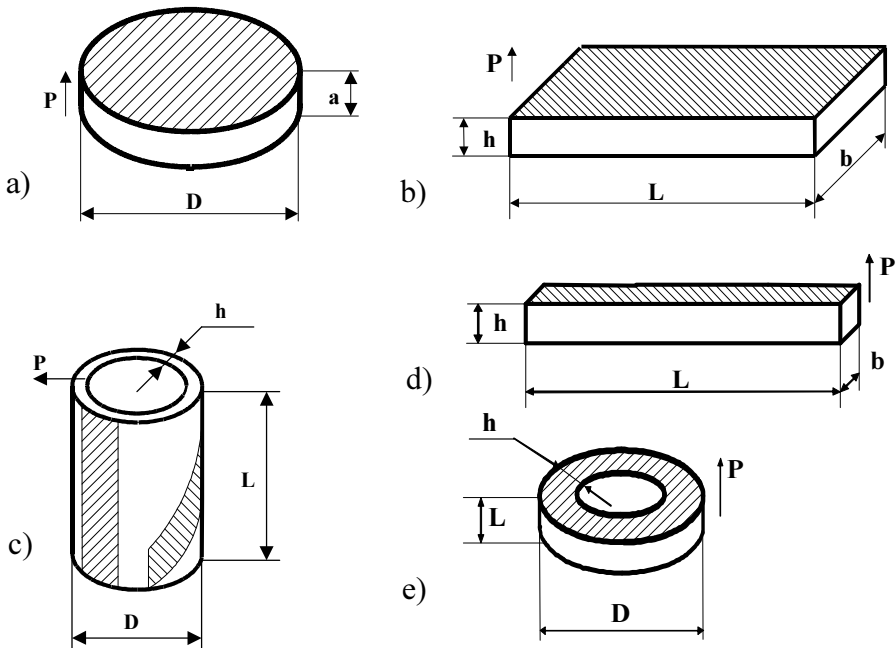
Todėl parenkant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių geometrinius parametrus, reikia atsižvelgti į tokias charakteristikas:

- generatoriaus parametrus;
- pereinamų procesų trukmę;
- dominuojančius virpesius;

- pjezokeitiklio savųjų dažnių tankį;
- konstrukcinius sistemos ypatumus.

Didelę įtaką pjezokeitiklio virpesiams turi pjezokeitiklio charakteringų geometrinių matmenų santykiai, pavyzdžiui, strypo ilgio ir pločio santykis, cilindro sienelės storio ir vidinio spindulio santykis. Būtent šie dydžiai apibrėžia pjezokeitiklio savųjų formų eiliškumą, kuris kinta, pasikeitus geometrinių matmenų santykiui.

Įrenginiuose, skirtuose vibracijai žadinti, naudojami įvairių geometrinių formų pjezokeitikliai. Paprasčiausi iš jų yra stačiakampės plokštelės, strypai, juostos, sukimosi kūnai – cilindrai, diskai, žiedai, sferos (1.1 pav.).



1.1. pav. Pagrindiniai pjezokeitiklių tipai: a – diskas; b – stačiakampė plokštelė; c – cilindras; d – strypas; e – žiedas

Fig. 1.1. The main types of piezotransducers: a – disc; b – rectangular plate; c – cylinder; d – beam; e – ring

Pjezokeitiklių klasifikavimas pagal tipus ir jų galimus virpesius:

- Disko, cilindro arba žiedo formos virpesių sistemos. Tokio tipo sistemose taikomi šie virpesiai:
 - lenkimo virpesiai, sklindantys statmena paviršiui kryptimi, kur išnaudojamos dvi tokio pat tipo rezonansinės virpesių formos;

- lenkimo virpesiai, sklindantys horizontaliame paviršiuje, kur yra išnaudojami tų pačių formų rezonansiniai virpesiai;
- radialiniai ir lenkimo virpesiai, sklindantys horizontaliame paviršiuje, kur išnaudojamos skirtingų virpesių formos.
- Strypo formos virpesių sistemos. Šiose sistemose naudojami virpesiai:
 - lenkimo virpesiai, išnaudojant tokio pat tipo rezonansines virpesių formas;
 - išilginiai ir sukimo virpesiai, panaudojant skirtingų formų rezonansinius virpesius.
- Plonos stačiakampio formos plokštelės virpesių sistemos. Šiose sistemose naudojami virpesiai:
 - išilginiai ir lenkimo virpesiai, gaunami išnaudojant skirtingų formų rezonansinius virpesius;
 - lenkimo virpesiai, gaunami išnaudojant tokias pat arba skirtingas rezonansinių virpesių formas.

Galimi ir specifinių formų pjezokeitikliai – trikampiai, pusiau sferos bei sudėtiniai elementai, tokie kaip daugiasluoksniai pjezokeitikliai su prijungtomis masėmis ir be jų.

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių įtempimų koncentracijos sumažinimui vibracinių smūgių metu, galimos įvairios energetiškai optimalios geometrinės formos. Vienas iš jų yra laiptuotos formos pjezokeitiklis su skerspjūvio mažėjimu keitiklio kontakto vietos link (Barauskas, Ostaševičius 1998; Kulvietis, Daugėla 1995; Бансявичюс, Рагульскис 1981).

Koncentratorių formos pjezokeitikliai gaminami, siekiant padidinti deformacijų amplitudes. Koncentratorių sistemas sąlyginai galima būtų suskirstyti į koncentratorius, turinčius deformacijų ir rezonansines greičio formas.

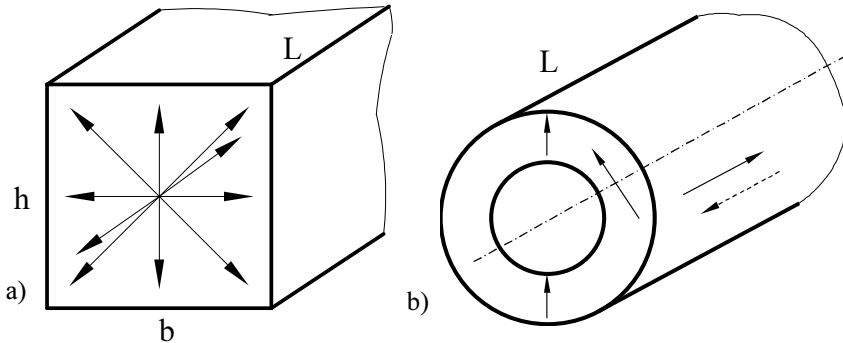
Elektrodų išdėstymo forma, plotas ir topologija yra viena svarbiausių pjezokeitiklių sistemos charakteristikų. Todėl parenkant elektrodų geometrinę formą ir išdėstymo vietas bei keičiant žadinimo įtampos fazę, galima gauti skirtingas pjezokeitiklio rezonansinių virpesių formas ir dažnius. Parinkus optimalią pjezokeitiklio elektrodų konfigūraciją, galima sumažinti pjezokeitiklio krūvį, įtempių lauką bei padidinti įrenginio tarnavimo laiką.

Nemažą įtaką pjezokeitiklio mechaninių virpesių laukui sudaro poliarizacijos vektoriaus kryptis. Paprastai pjezokeitiklio poliarizacija būna lygiagreti elektrodų išdėstymo plokštumai arba statmena jai.

Bet pasitaiko atveju, kai sudėtingiems daugiakomponenčiams virpesiams žadinti yra naudojamas kintamas poliarizacijos vektorius. Tokiu atveju skirtingose pjezokeitiklio vietose vektoriaus kryptis būna skirtinga.

1.2 paveiksle rodyklėmis pavaizduotos dažniausiai naudojamos poliarizacijos kryptys strypiniame (Бансявичюс, Рагульскис 1981) ir cilindro formos pjezokeitikliuose (Джагупов, Ерофеев 1986).

Padidinti pjezomodulių kitimo intervalą ir išplėsti pjezokeitiklio funkcines galimybes galima panaudojus daugiamatę poliarizaciją koordinatinių ašių atžvilgiu, o taip pat visą arba dalinį poliarizacijos ciklą.



1.2 pav. Galimos poliarizacijos vektoriaus kryptys pjezokeitikliuose: *a* – strypo formos; *b* – cilindro formos

Fig. 1.2. Possible directions of polarisation vector in piezotransducers: *a* – beam form; *b* – cylinder form

Vykdamt analizę reikia atsižvelgti į elektrines bei mechanines kraštines sąlygas, kurios turi nemažą įtaką pjezokeitiklių virpesiams.

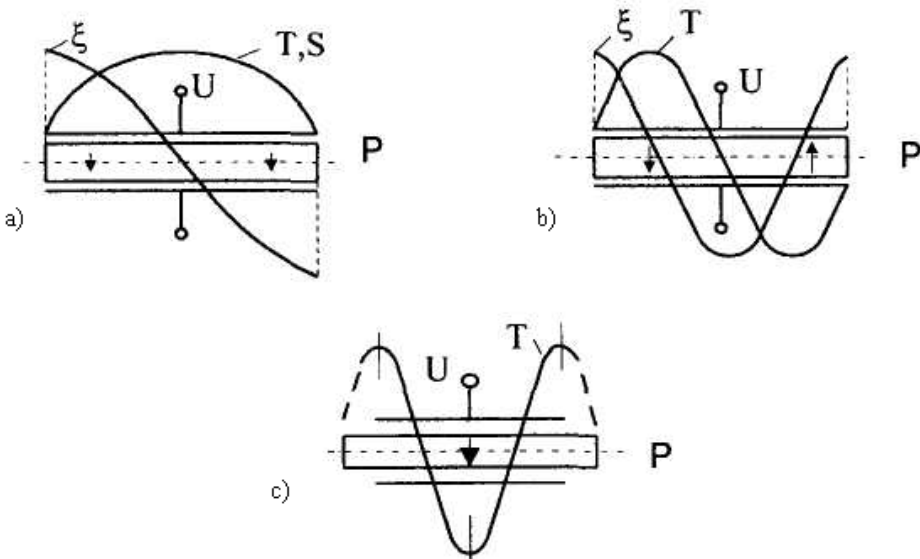
Pjezokeitiklio elektrines kraštines sąlygas virpesių kryptims nusako žadinamo elektrinio lauko ir poslinkių vektorių tarpusavio orientacija. Tuo tarpu pjezokeitiklio mechanines kraštines sąlygas nusako pjezokeitiklio tvirtinimo taškai ir sąlygos.

Keičiant visus aukščiau paminėtus parametrus, kurie įtakoja pjezokeitiklio virpesių žadinimą, galima generuoti sudėtingus erdvinis judesius, slopinti pašalinius judesius bei sustiprinti reikiamus virpesių tipus.

Plačios pjezokeitiklio galimybės leidžia sukurti daug įvairių pjezokeitiklio sistemų variantų.

Laisvam pjezokeitikliui galima sužadinti 1–3 modas, 1.3 paveiksle pavaizduotas atitinkamai a, b, ir c.

Norimą virpesių modą galima išgauti, keičiant elektrodų išdėstymą. 1.3 paveiksle, c parodyta, kaip simetriškai trumpinant elektrodus iš kraštų, galima užgesinti nelyginės modos virpesius (Bubulis 2002).



1.3 pav. Pjezoelementų elektrodų išdėstymas, jų poliarizacija ir galimi sužadunami virpesiai

Fig. 1.3. Arrangement of electrodes, polarisation and possible excited vibrations of piezoelements

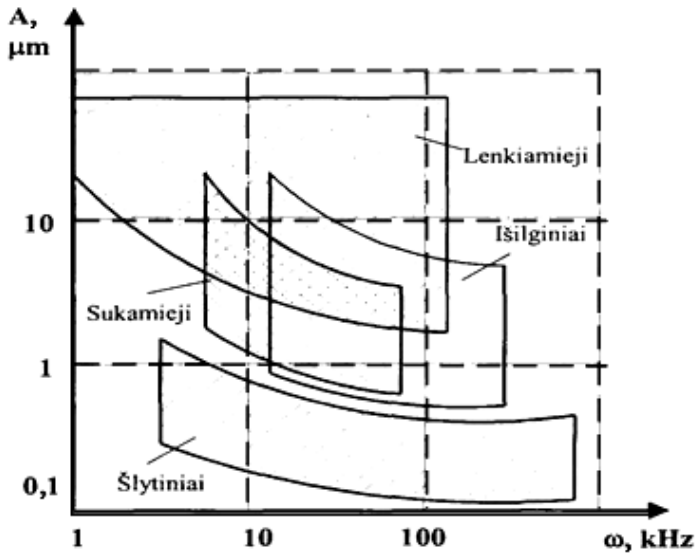
Nanometrines skyro mikrorobotų pjezokeitikliuose gali būti žadinami įvairių formų virpesiai: išilginiai, lenkimo, sukimo, radialiniai, skersiniai (įvairių krypčių), o taip pat stovinčiųjų ir (arba) bėgančiųjų bangų interferencijos pagrindu gaunami virpesiai.

Analizuojant 1.4 paveiksle pateiktas virpesių amplitudes matoma, jog lenkimo svyravimai turi didžiausias reikšmes, jos siekia nuo $1\ \mu\text{m}$ iki $12\ \mu\text{m}$. Kiek mažesnės amplitudės $0,5\text{--}10\ \mu\text{m}$ turi sukamųjų ir išilginių virpesių, o patys mažiausi šlytiniai – $0,1\text{--}1\ \mu\text{m}$.

Tuo tarpu analizuojant pjezokeitiklio virpesių dažnių pasiskirstymą matoma, jog didžiausią dažnį turi šlytiniai virpesiai, kurie siekia $500\ \text{kHz}$ ir daugiau.

Kiek mažesnę dažnį turi išilginiai ir sukamieji virpesiai, o patį mažiausią $1\text{--}100\ \text{kHz}$ – lenkimo (Ragulskis *et al.* 1988).

Be visų minėtų tipų virpesių, vibraciniuose įrenginiuose naudojamuose pjezokeitikliuose gali būti žadinamos ir įvairios jų kombinacijos, t. y. daugiakomponenčiai virpesiai.



1.4 pav. Pjezokeitiklių amplitudžių ir dažnių kitimo sritys įvairių tipų virpesiams (Ragulskis *et al.* 1988)

Fig. 1.4. Variation fields of amplitudes and frequencies of piezotransducers for various types of oscillation

Projektuojant daugiakomponentes nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių sistemas, daugiakomponenčiai virpesiai gaunami sujungiant skirtingų tipų svyravimus, sukonstruotus taikant vienodo dažnio dviejų virpesių šaltinių rezonansinių formų derinius:

- lenkimo – lenkimo;
- išilginių (radialinių) – lenkimo;
- radialinių – išilginių;
- lenkimo – sukimo;
- išilginių – sukimo.

Atsižvelgiant į rezonansinių formų skirtingumą, pjezokeitiklius galima suskirstyti į dvi grupes:

- Pjezokeitikliai, kuriuose taikomi tos pačios formos virpesiai.
- Pjezokeitikliai, kuriuose taikomi skirtingų formų virpesiai.

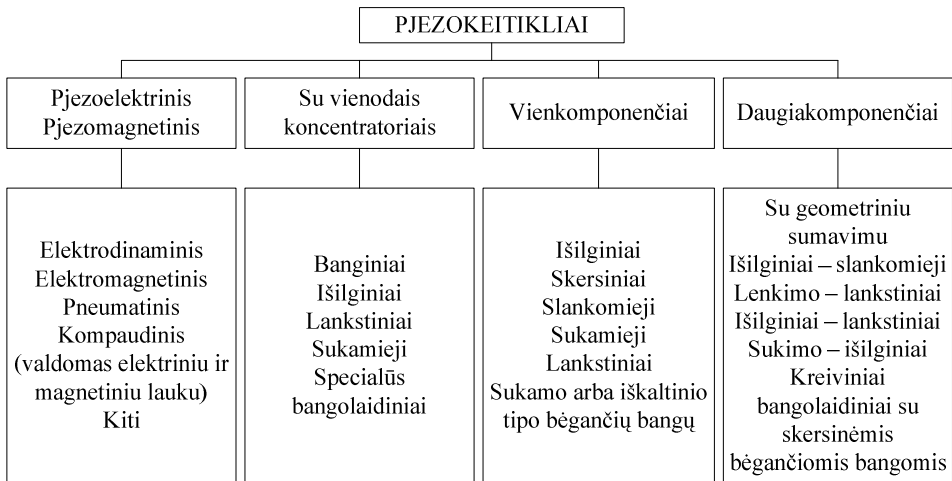
Taip pat pjezokeitiklius galima skirstyti atsižvelgiant į elipsinio judesio sukūrimo būdus (Bansevicius *et al.* 1995; Бансввичюс, Рагульскис 1981):

- Mišraus tipo pjezokeitikliai. Tokiomis sistemomis galima gauti pakankamai didelį elipsinį judesį net tada, kai sistema dirba ne rezonanse. Šio tipo pjezokeitikliai pasižymi elipsinio judesio stabilumu.

- Pjezokeitikliai, kurių kiekvieną sudaro keli nepriklausomai veikiantys keitikliai, turintys vienodą rezonansinį dažnį.
- Pjezokeitikliai, kuriuose sužadunami vienos formos rezonansiniai virpesiai. Šio tipo pjezokeitikliai priklauso pradinių sistemų grupei. Šių sistemų trūkumas yra tas, kad dėl sistemos apribojimų sunkiai realizuojamas reversinis judesys. Tačiau jos pranašesnės už kitas dėl to, kad gali veikti naudojamos vienos fazės maitinimo šaltinių ir suteikti didelį sukimo momentą bei stabilų judesį kūnui, sąveikaujančiam su ja.

Remiantis šiuo principu, galima gauti praktiškai bet kokios formos pjezokeitiklio kontakto taško trajektoriją.

Apibendrinimui pateikiama 1.5 paveiksle pjezokeitiklius klasifikuojanti schema.



1.5 pav. Pjezokeitiklių klasifikacija (Ragulskis *et al.* 1988)

Fig. 1.5. Classification of piezotransducers

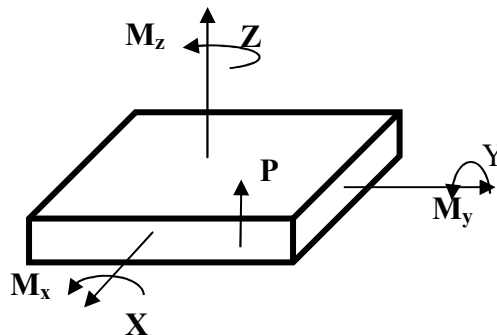
Tokių daugiakomponenčių virpesių žadinimo ir analizės būdą, kai sumuojami atskirų tipų virpesiai, galima naudoti tik remiantis klasikine kieto deformuojamo kūno teorija. Superpozicijos principas nepriklausomiems virpesiams negalioja, nes pjezokeitiklyje egzistuoja netiesinių tarpusavyje susietų virpesių laukas.

Nagrinėjant pjezokeitiklį kaip kontinuumo sistemą, pastebėta, jog dėl Puasono ryšių net ir vienos komponentės virpesiai inicijuoja kitos formos virpesius.

Tokių susietų virpesių intensyvumas priklauso nuo skirtumo mažinimo tarp keitiklio aukščio, ilgio bei pločio matmenų.

1.2. Pjezoeфекto reiškinys pjezokeitiklių modeliavime

Pjezokeraminės medžiagos – tai polikristalai, turintys jonizuotą, asimetrinę kristalinę gardelę. Pjezokeramika pasižymi liekamąja poliarizacija, pjezoeфекtu ir kitomis pjezokeramikos savybėmis, nes kristalinė gardelė neturi simetrijos centro. Tiesioginis pjezoeфекtas pasireiškia, kai kristalinė gardelė veikiama išorinės jėgos deformuojasi skirtingomis kryptimis, tai polikristalo priešinguose paviršiuose kaupiasi skirtingų ženklų krūviai. Maksimalus tiesioginis pjezoeфекtas gaunamas, kai mechaninių deformacijų vektoriaus kryptis sutampa su pjezokeraminės medžiagos pjezoašimi. Šis efektas gaunamas taip pat deformuojant pjezokeraminį elementą mechaninės ašies kryptimi. Verta pastebėti, jog pjezoeфекtas nepasireiškia esant bet kokiam mechaniniam poveikiui optinės ašies kryptimi. Fizikinis atvirkštinio pjezoeфекto mechanizmas yra aiškinamas naudojant analogišką modelį kaip ir tiesioginis. Kai pjezoelektrinio elemento poliarizacijos ašiai statmeni paviršiai yra apkrauti priešingų ženklų elektros krūviais, elektrostatiinių jėgų veikiami deformuojasi kristalinė gardelė. Jei atvirkštinį pjezoeфекtą reikėtų paaiškinti fizikine prasme, tai jis būtų panašus į kiekvienam dielektrikui būdingą elektrostrikcijos reiškinį, tačiau yra ir esminių skirtumų.



1.6 pav. Pjezokeraminio elemento ašių orientacija
Fig. 1.6. The orientation of axes of piezoceramic element

Poliarizacijos vektoriaus išraiška aprašoma tokia lygtimi (Джагунов, Ерофеев 1986; Плужников, Семенов 1971; Сивухин 1977; Смажевская, Фельдман 1971):

$$\{P\} = [d]\{\sigma\}, \quad (1.2)$$

čia $\{P\}$, $\{\sigma\}$ – poliarizacijos ir mechaninių įtempimų vektoriai; $[d]$ – medžiagos pjezoelektrinių modulių matrica.

Pjezoelektrinių modulių matrica, atsižvelgiant į pjezokeraminės medžiagos anizotropines savybes, bendru atveju turi tokią išraišką (ANSYS 10.0; Джагупов, Ерофеев 1986):

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Pjezokeraminės struktūros elementaraus tūrio tiesinės pjezoelektrinio efekto lygčių sistema (1.4) yra viena iš keturių galimų pjezoelektrinio efekto išraiškos formų.

Ši išraiška parinkta, nes ji yra tinkamiausia mechatronikos analizės atžvilgiu (Баранскас *et al.* 1984; Джагупов, Ерофеев 1986):

$$\begin{cases} \{\sigma\} = [c^E]\{\varepsilon\} - [e]^T \{E\} \\ \{D\} = [e]\{\varepsilon\} + [\varepsilon^E]\{E\} \end{cases}, \quad (1.4)$$

čia $\{D\}$, $\{E\}$, $\{\varepsilon\}$, $\{\sigma\}$ – elektrinės indukcijos, elektrinio lauko stiprumo, mechaninių deformacijų ir mechaninių įtempimų vektoriai;

$[c^E]$, $[\varepsilon^E]$, $[e]$ – tamprumo matrica, kai yra pastovus elektrinio lauko stiprumas, dielektrinių konstantų matrica, kai yra pastovios mechaninės deformacijos, pjezoelektrinių konstantų matrica.

Užrašant mechaninių įtempimų vektoriaus išraišką lygtyje (1.4), yra naudojama pjezoelektrinių konstantų matrica, kuri turi tokią išraišką (Tzou 1993; Джагупов, Ерофеев 1986):

$$[e] = [d][c^E]. \quad (1.5)$$

Esant poliarizacijos vektoriaus kryptčiai kaip parodyta 1.6 paveiksle ir pastoviam elektrinio lauko stiprumui, pjezokeitiklio tamprumo matrica užrašoma taip (Barauskas, Ostasevičius 1998; ANSYS 10.0):

$$[c^E] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

Pjezokeitiklio elektrinių charakteristikų apibrėžimui yra naudojami tokie dydžiai: elektrinio lauko stiprumas, elektrinė indukcija, dielektrinės konstantos. Šie dydžiai tarpusavyje susieti lygtimi (Джагупов, Ерофеев 1986; Глозман 1972; Смажевская, Фельдман 1971):

$$\{D\} = [\varepsilon]\{E\}. \quad (1.7)$$

Pjezoelektrinės medžiagos dielektrinių konstantų matricos išraiška bendruoju atveju yra tokia (Мэзон 1969; Сивухин 1977; Смажевская, Фельдман 1971):

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}. \quad (1.8)$$

Cilindrinų pjezokeitiklių atveju dažnai skersinė pjezokeramikos kryptis sutampa su cilindrinės koordinačių sistemos radialine kryptimi.

Todėl sukeičiant kryptis O_x ir O_z atitinkančių konstantų vietas, konstantų matricos (1.3), (1.6) ir (1.8) transformuojamos ir užrašomos taip (Barauskas, Ostasevičius 1998; Мэзон 1969):

$$[d] = \begin{bmatrix} d_{33} & d_{31} & d_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \end{bmatrix}, \quad [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{33} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{11} \end{bmatrix},$$

$$[c^E] = \begin{bmatrix} c_{33} & c_{13} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix}. \quad (1.9)$$

Pjezojautrumas yra svarbiausia pjezokeraminių medžiagų, naudojamų jutikliuose, charakteristika. Šią savybę apibūdina pjezoelektrinis įtempimų koeficientas, kuris aprašomas taip (Tzou 1993; Джагупов, Ерофеев 1986):

$$[g] = [\varepsilon^\sigma]^{-1} [d], \quad (1.10)$$

čia $[g]$ – pjezoelektrinė įtempimų koeficientų matrica, o $[\varepsilon^\sigma]$ – dielektrinių konstantų matrica, kai yra pastovūs mechaniniai įtempimai. Ji parodo ateinančio nuo keitiklio elektrodų elektrinio signalo stiprumą, tuo pačiu metu naudojant jį padėties, greičio ir jėgos dydžio matavimams.

Pjezoelektrinis deformacijos koeficientas apibrėžia mechaninius įtempimus, atsiradusius pasikeitus elektrinio krūvio tankiui (Tzou 1993; Джагупов, Ерофеев 1986):

$$[h] = [g] [c^D], \quad (1.11)$$

čia $[h]$ – pjezoelektrinė deformacijų koeficientų matrica, o $[c^D]$ – tamprumo matrica, kai yra pastovus elektrinės indukcijos vektorius.

Projektuojant pjezokeitiklius, parenkamos pjezokeraminės medžiagos, kurios turi dideles elektromechaninio koeficiento reikšmes, nes šis koeficientas įtakoja pjezokeitiklio darbo efektyvumą. Elektromechaninis koeficientas apibūdina procesą, kurio metu veikiant pjezoelektrinį elementą išorinėmis mechaninėmis apkrovomis, dalis mechaninės energijos pereina į akumuluojamą elemente elektrinę energiją. Šis koeficientas aprašomas taip (Мэзон 1969; Плужников, Семенов 1971):

$$k_E = \sqrt{\frac{h^2 \varepsilon^\varepsilon}{c^D}}, \quad (1.12)$$

čia k_E – elektromechaninis koeficientas.

Atliekant pjezokeitiklių pagrindinių charakteristikų, apibrėžiančių pjezokeraminės medžiagos savybės, analizę, buvo laikomasi sąlygos, jog pjezoefekto reiškinyje aprašomas kaip tiesinė sistema.

Dėl šios priežasties pagrindinė (1.4) lygčių sistema, kuri aprašo pjezoelektrinius procesus, yra taikoma tik esant mažiems fizikinių dydžių pokyčiams. Nors atskirais atvejais gali būti taikoma ir apibūdinant kvazitiesinę sistemą su kintamais koeficientais. Norint aprašyti realiai egzistuojančias netiesines pjezoelektrinio efekto savybes, reikėtų atlikti papildomą reiškinių analizę.

1.3. Pjezokeitiklių modeliavimo darbų analizė

Jau septintajame dešimtmetyje, įsisavinus pjezokeraminių medžiagų sintezės ir gamybos technologijas, buvo pradėti intensyvūs skaitiniai pjezokeitiklių tyrimai. Pirmieji tokiais tyrimais susidomėjo Japonijos, JAV, Rusijos, bei Lietuvos mokslininkai. Jų pastangomis buvo sukurta fundamentinė vibromechanikos teorija, vibracinių įrenginių matematiniai modeliai, nauji skaitiniai metodai. Tuo tarpu jau aštuntajame dešimtmetyje pjezokeitiklių modeliavime pradėtas naudoti galingas sistemų diskretizavimo būdas – baigtinių elementų metodas, sukurti pjezoelektriniai baigtiniai elementai, kurie šiuo metu naudojami daugelyje baigtinių elementų metodo programinių paketų.

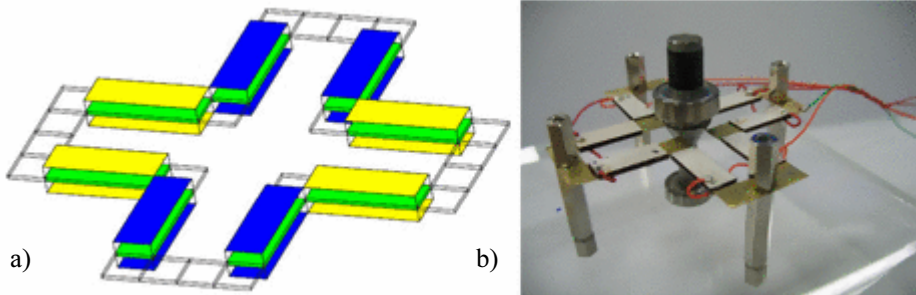
Didelę pažangą pjezomechaninių sistemų kūrime, bei jų pritaikyme komercinėms rinkoms, padarė Japonijos mokslininkai. Jų pastangomis sukurti vibraciniai varikliai, skeneriai, purkštuvai, jau plačiai naudojami pramonėje bei buitiniuose įrenginiuose. Pjezokeraminiai elementai šiuo metu naudojami gaminant adatinių (NEC) bei rašalinių (Epson) spausdintuvų galvutes, automatinius fokusavimo mechanizmus fotoaparatuose (Canon) ir mobilių telefonų fotokameros (Sony), vaizdo grotuvų sekimo galvutes (Sony, Matsushida Electric) bei reles (ORMON).

K. Uchino, S. Ueha, Y. Sashida buvo vieni iš pirmųjų Japonijos mokslininkų, sukūrę ir išnagrinęję ultragarsinius ir impulsinius vibrovariklius, pjezokeitiklių sistemas, jų veikimo principus bei elektrodų formas ir topologijas (Uchino 2010).

Japonijos Tohoku universiteto mokslininkai bendradarbiaujant su kitų universitetų mokslininkais atliko pjezokeraminio cilindro virpesių tyrimus bei išnagrinėjo jų valdymo metodus. Skaitiniams tyrimams pritaikė modalinį išplėstinį metodą (angl. *modal expansion method*), kuriuo buvo gautos pjezokeraminio cilindro būvio lygtys kai pjezokeraminis cilindras buvo analizuotas kaip keitiklis ir sensorius. Jų pastangų dėka buvo sukurta originali pjezokeraminio cilindro elektrodų konfigūracija sukamiesiems virpesiams žadinti (Uchino 1997; Uchino, Giniewicz 2003; Qiu *et al.* 1994; Badel *et al.* 2006; Marqui *et al.* 2009; Qiu, Ji 2010).

Japonijos Tohoku universiteto mokslininkas K. Uchino kartu su bendraautoriais pasiūlė pjezoelektrinį variklį naudojantį statmeną lenkimo būdą tuščiaaviduriame cilindre.

Taip pat sukūrė pjezoelektrinį rotacinį variklį, kurį sudaro plona kryžiaus formos žalvario plokštelė prie kurios pritvirtinta šešiolika pjezokeramikinių plokštelių iš viršaus ir apačios (Koc 2002; Park 2010). Pjezoelektrinio variklio modelis pateiktas 1.7 paveiksle.



1.7 pav. Kryžiaus formos pjezoelektrinis variklis: a) Pjezokeramikinių plokštelių tvirtinimo vietos; b) Pjezoelektrinio variklio modelis (Park 2010)

Fig. 1.7. Cross-shaped piezoelectric motor: a) Fixing places of piezoceramic plates; b) The model of piezoelectric motor

Japonijos mokslininkas H. S. Tzou atliko pjezoelektrinių kevalinių elementų teorinius ir skaitinius tyrimus.

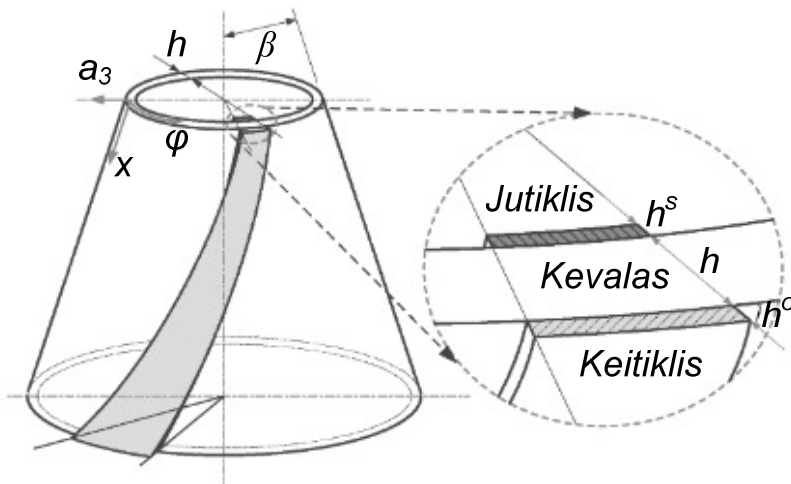
Jo darbuose buvo tiriamos kevalinių elementų panaudojimo galimybės preciziniams ultragarsiniams įrenginiams pjezokeitikliams bei sensoriams.

Jis taip pat sukūrė ir išnagrinėjo aštuonių mazgų izoparametrinius aštuonkampius erdvinius pjezoelektrinius elementus su aštuoniais ir vienuolika (trys vidiniai) laisvės laipsnių mazge (Tzou 1993; Li 2010a; Li 2010b; Wang 2011).

1.8 paveiksle pateiktas kevalinis sistemos elementas su sraigto formos pjezokeitikliu.

Japonijos kompanijoje Meico Co., naudojant pjezokeramines plokštes mechaniniams virpesiams žadinti, buvo sukurta mikromobili mašina. Sistemos judėjimą plokštumoje užtikrino plokštelėse sužadunami lenkimo virpesiai perduodami smeigtuko tipo „kojoms“ (Matsuoka *et al.* 1994).

Panašaus pobūdžio eksperimentinius tyrimus atliko ir Japonijos Gifu universiteto mokslininkai, sukūrė „vorą“ – mikromobilią pjezokeraminę sistemą (Tsuruta *et al.* 1999).



1.8 pav. Kevalinis sistemos elementas su sraigto formos pjezokeitikliu (Li 2010b)
Fig. 1.8. Shell-shaped element of system with screw-shaped piezotransducer

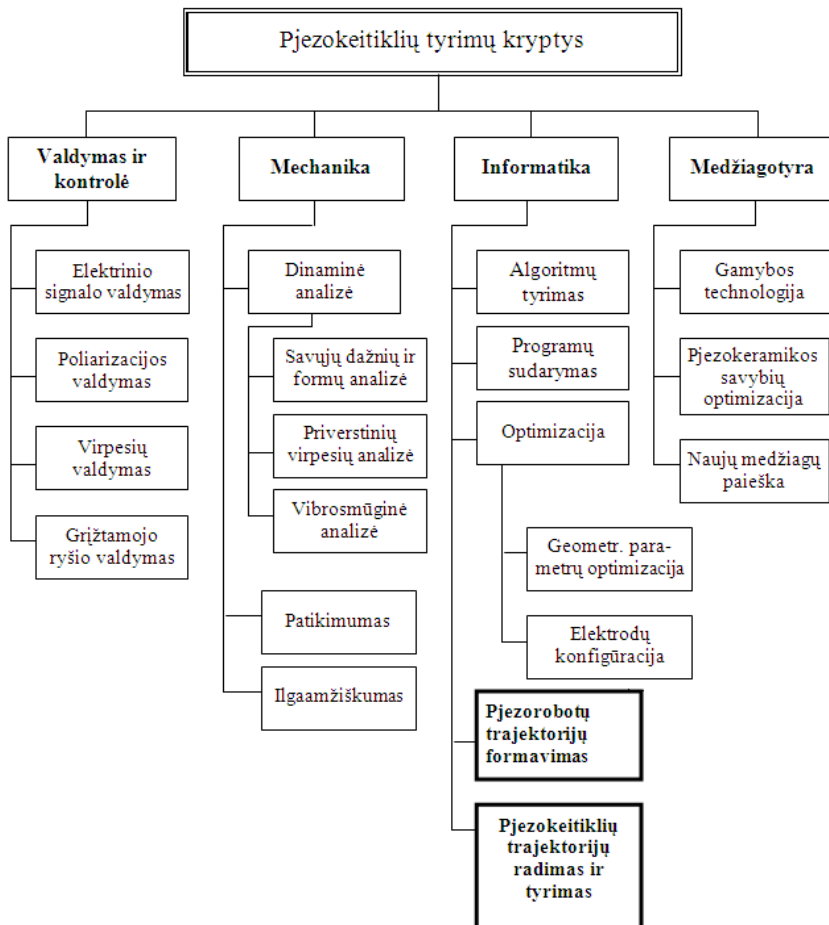
Nanometrines skyros mikrorobotu pjezokeitiklius, pjezoelektrinius irenginius bei ju konstrukcijas tyre ir mokslininkai is D. Britanijos Bristol ir Loughborough technologijos universitetu, Prancuzijos Nacionalinio Taikomuju mokslu Instituto Lione, Japonijos Tohoku universiteto, Kinijos Changchun optikos ir tiksliosios mechanikos instituto, JAV Pensilvanijos valstijos universiteto bei kiti (Qiu *et al.* 1994; Tainhong *et al.* 1994; Wang 2004; Badel *et al.* 2006).

Pjezomechaniniu sistemu analize apima tokias, is pirmo zvilgsnio skirtingas mokslo sritis, kaip mechanika, medziagotyra, valdymo teorija bei informatika. Pazvelgus giliau, cia galima rasti rysii tarp elektrodinaminiu Maksvelio ir kontinuumo sistemu dinamikos lygciu. Todeli pjezomechaniniu sistemu tyrimai seniai perzengeli klasikinės mechanikos ribas, taip sukurdami nauja mechatronikos pasauli.

Nanometrines skyros mikrorobotu pjezokeitikliu analize yra daugialypė. Sintezuojant mechaninius ir elektrinius laukus, galima isgauti tarpusavio saveikos bei valdymo ypatumus. Todeli nanometrines skyros mikrorobotu pjezomechaniniu sistemu tyrimai yra atliekami kompleksiskai ivertinant elektrines ir mechanines savybes.

Pjezokeitikliu panaudojimas vibraciniuose irenginiuose igalina mus kontroliuoti bei per trumpa laika keisti sistemos struktura. Sios galimybės leidžia lengvai keisti mechaniniu laisves laipsniu skaičiu bei kurti griztamojo ryšio sistemas. Todeli šis lankstumas yra labai aktualus kuriant irenginius precizineje inžinerijoje (Matsuoka *et al.* 1994).

D. Mažeika savo darbe atlikdamas pjezokeitiklių tyrimų apžvalgą, pateikė susistemintas pagrindines pjezokeitiklių tyrimų kryptis (Mažeika 1999). Šiame darbe jos papildytos dar dviem naujom informatikos tyrimų šakom: „Pjezorobotų trajektorijų formavimas“ ir „Pjezokeitiklių trajektorijų radimas ir tyrimas“. Atliktus pjezorobotų trajektorijų formavimo darbus aprašinėjo A. Drukteinienė (Drukteinienė 2011). Jos indėlio trumpa apžvalga bus pristatyta šiame skyriuje. Pjezokeitiklių trajektorijų radimas ir tyrimas buvo atliktas ir aprašytas šiame darbe, 3–4 skyriuose. Papildytos susistemintos pagrindinės pjezokeitiklių tyrimų kryptys pateiktos 1.9 paveiksle.



1.9 pav. Pagrindinės pjezokeitiklių tyrimų kryptys (Mažeika 1999)

Fig. 1.9. The main research areas of piezotransducers

Nanometrinės skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tyrimus pagal kiekvieną kryptį galima būtų suskirstyti į teorinius, skaitinius, eksperimentinius bei gamybos tyrimus, kurie, žinoma, glaudžiai tarpusavyje susiję.

Teoriniai tyrimai apima fundamentinius vibromechanikos, medžiagotyros, deformuojamų kūnų virpesių ir projektavimo teorijos bei sistemų optimalaus valdymo darbus.

Pjezomechaninių sistemų skaitinių tyrimų metu yra kuriami bei analizuojami skaitiniai pjezokeitiklių modeliai, kurie adekvačiai aprašo fizikinius procesus, vykstančius sistemų funkcionavimo metu. Taip pat nagrinėjamos pjezokeitiklių geometrinės formos, elektrodų konfigūracijos optimizavimo problemos, kuriami skaitiniai sistemų analizės metodai. Įvairių geometrinių formų pjezokeitiklių modeliavimui, baigtinių elementų kūrimui bei jų pritaikymo nagrinėjimui skaitinių tyrimų metu yra naudojamas baigtinių elementų metodas.

Eksperimentinių tyrimų metu yra tikrinami skaitinių tyrimų rezultatai, sprendžiamos pjezokeitiklių greitaveikos, vibrosmūginio pastovumo, patikimumo bei ilgaamžiškumo problemos. Eksperimentiniai nanometrinės skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tyrimai sietini su precizinių pjezomechaninių įrenginių: vibrovariklių, pozicionavimo įrenginių, mikromanipuliatorių, dozatorių bei siurblių, kuriuose jie yra naudojami, kūrimu ir nagrinėjimu.

Pjezokeitiklių gamybos technologiniuose tyrimuose atliekama naujų pjezokeraminių medžiagų paieška, tobulinami poliarizacijos procesai, vystomos pjezokeitiklio paviršiaus padengimo elektrodais technologijos.

Pirmas konkretų kieto kūno dalelių judėjimo būdą nuožulnia plokštuma aprašė G. Dinderis savo darbe: „Forderrinen Die Ford Technik“ – 1912 m. (Hirata *et al.* 1993). Jis tyrinėjo neatitrūkstančių nuo plokštumos dalelių judėjimą. Panašaus vibracinio dalelių judėjimo klausimus tyrinėjo L. Levinsonas (Чигарев *et al.* 2004), L. Loicianskis ir A. Lužje (Лавриненко *et al.* 1968), o taip pat ir kiti autoriai.

Visą dėmesį autoriai sutelkė į technines detalių judėjimo problemas, tačiau aukšto dažnio tampriųjų bangų sklidimo nei plokštumoje, nei dalelėse netyrinėjo. Tik apie 1960 metus buvo sukurtos pirmosios ultragarsinės virpesių sistemos, kuriose tamprioji banga, sklisdama kietame kūne, sukelia jame tokias deformacijas, kurios gali būti naudojamos kitų kūnų poslinkiams.

Tokias ultragarsines virpesių sistemas pirmasis pradėjo tyrinėti M. E. Archangelskij (Uchino *et al.* 1989). Jis 1963 m. pirmasis suformulavo teorinius principus, kaip pakeisti tampriojo strypo virpesius į kontaktuojančio kūno sukamąjį arba tiesiaiegi judesį. M. E. Archangelskij, remdamasis virpesių superpozicijos principu, tyrinėjo strypo išilginius ir lenkimo virpesius, sukeliančius su juo sąveikaujančio kūno slenkamąjį ar sukamąjį judėjimą, dėl

kurio strypo kontakto taškas juda elipsės formos trajektorija ir gaunamas pertraukiamo tipo mechaninis kontaktas.

Po metų 1964 m. Ukrainos mokslininkas V. V. Lavrinenko ir jo vadovaujamas kolektyvas atliko daug įdomių ir efektyvių tyrimų ultragarsinių virpesių sistemų srityje. Jie, panaudodami plokštelės ir žiedo formos piezokeramiką, sukūrė ir ištyrė daug tipinių ultragarsinių virpesių sistemų, sukeliančių kieto kūno judėjimą, tarp jų sukamojo judesio vibracinį variklį, naudojantį piezokeraminį elementą (Васильев *et al.* 1975; Голямина *et al.* 1979).

Kiek vėliau 1969 m. aktyvius darbus šioje srityje pradėjo KTU ir mokslinės draugijos „Vibrotechnika“ mokslininkai, kurie jau 1971 m. sukūrė pirmuosius veikiančius piezoelektrinių mechanizmų pavyzdžius (Daugėla *et al.* 1995; Lietuvos mokslas ... 1998; Ragulskis *et al.* 1988; Бансявичюс *et al.* 1985; Бансявичюс, Рагульскис 1981; Бараускас *et al.* 1984). Tuo tarpu JAV pirmasis vibrovariklis buvo sukonstruotas tik 1973 m. (Uchino 1997). „Vibrotechnikos“ mokslininkų ir jos įkūrėjo bei ilgamečio vadovo akademiko K. Ragulskio atlikti piezokeitiklių virpesių tyrimai turėjo įtakos kuriant fundamentinius teorinius vibromechanikos darbus.

Akademikai K. Ragulskis ir R. Bansevičius naudodami įvairias piezokeitiklių sistemas bei remdamiesi teorija tyrė vibracinių variklių schemas, veikimo bei konstravimo principus. Jie išnagrinėjo strypinių piezokeitiklių, atliekančių erdvinius virpesius, elektrodų konfigūracijas, kurios užtikrina paprastą ir reversinį išėjimo grandies judesį. Jiems pavyko naudojant kintamą poliarizacijos kryptį, sužadinti sudėtingus net keturių komponenčių piezokeitiklio virpesius strypinių piezokeitiklių sistemose (Lietuvos mokslas... 1998).

Akademikai K. Ragulskis ir R. Bansevičius išnagrinėjo cilindro formos ašinę ir radialinę poliarizaciją turinčius piezokeitiklius, jų elektrodų išdėstymą, žadinant išilginius – sukamuosius, lenkimo – sukamuosius virpesius. Buvo sukurti originalūs stovinčiosios ir bėgančiosios bangos tipo piezokeitikliai, turintys žiedo, žiedo sektoriaus bei kitas kreivines geometrines formas.

Buvo išanalizuota koncentratorių įtaka piezokeitiklio virpesių amplitudei ir greičiui. Buvo sukurtos veikiančios sistemos su kintamuju laisvės laipsnių skaičiumi bei įvesta nauja aktyvios kinematinės poros sąvoka mechatronikoje. Naudojant piezokeitiklius, sukurtos aktyviųjų guolių sistemos, atlikti jų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai (Lietuvos mokslas... 1998).

Akademikai kartu su kolegomis A. Busilu, R. Barausku, R. Kurila, I. Gasiūnu, A. Žuku, P. Vasiljevu pasiūlė daug teorinių bei praktinių patobulinimų tampriųjų kūno virpesių transformacijai į tiesiaėigį ar sukamąjį išėjimo grandies judesį atlikti. Daugelis jų sistemų yra patvirtintos patentais ir

panaudotos veikiančiuose vibracinio tipo įrenginiuose (Lietuvos mokslas... 1998).

P. Vasiljevas nagrinėjo ultragarsines sistemas, kuriose buvo naudojami sudėtiniai laiptuotos formos pjezokeraminiai keitikliai. Remiantis atliktais tyrimais, sukurta teorija ir skaičiavimo metodika išilginiams rezonansiniams virpesiams minėtuose pjezokeitikliuose sužadinti. Panaudojus laiptuotos formos pjezokeitikius sukurti tokie vibraciniai įrenginiai: vibraciniai varikliai, skysčių siurbliai ir purkštuvai, ypač smulkių biriųjų medžiagų siojimo įrenginiai, sintetinių medžiagų suvirinimo ir pjovimo staklės bei kiti įrenginiai (Lietuvos mokslas... 1998).

Baigtinių elementų metodo raidos istorija prasideda šeštajame dešimtmetyje. Vieną iš pirmų straipsnių 1956 metais su bendraautoriais parašė Turner (Turner *et al.* 1956), o besibaigiant septintajam dešimtmečiui pasirodė pirmosios knygos, skirtos baigtinių elementų metodui. Didelę įtaką baigtinių elementų metodo raidai turėjo Zienkiewicz (Zienkiewicz 1967) darbai. Tačiau reikėtų neužmiršti, kad dėl silpnų to meto kompiuterinių galimybių, sprendžiamų uždavinių apimtis buvo labai ribota, todėl tinklo generavimo technikoms bei algoritmams buvo skiriama palyginti mažai dėmesio. Sprendžiant tuo metu aktualius uždavinius tiesiog buvo stengiamasi kaip galima labiau sumažinti tinklo elementų skaičių, kad baigtinių elementų uždavinių galėtų išspręsti tuo metu prieinami ribotos atminties bei greičio kompiuteriai. Aštuntajame dešimtmetyje situacija pasikeitė dėl per didelės sprendžiamo uždavinio dydžio apimties pagrindiniu tikslu tapo automatinų tinklo generavimo algoritmų kūrimas bei tobulinimas. Būtent dėl šios priežasties to meto straipsniuose bei knygoje daugiausia dėmesio buvo skiriama ir tinklo generavimo algoritmams (Irons, Ahmad 1980; Hinton, Owen 1979; Bathe 1978; Desai, Abel 1972). Devintajame dešimtmetyje skaičiavimo stočių atmintis buvo jau pakankamai didelė, kad galėtų išspręsti sudėtingus uždavinius, tačiau asmeninių kompiuterių pajėgumai dar buvo riboti, todėl įvairūs uždavinių sprendimo pagreitinimo algoritmai išliko vis dar aktualūs. Taip pat reikėtų paminėti, kad kaip tik tuo laikotarpiu buvo automatizuotos paklaidų vertinimo procedūros taikant poprocesorinius paklaidų vertinimo metodus. Dešimtajame dešimtmetyje tinklo generavimas tapo vienu iš svarbesnių baigtinių elementų analizės priešprocesorinių žingsnių. Baigtinių elementų analizės automatizavimas naudojant diskretizacijos paklaidos vertinimą bei prisitaikančiuosius tinklus kėlė vis didesnę susidomėjimą tiek gamyboje, tiek moksle (Akin, 1994), todėl ypač daug mokslininkų dirbo prisitaikančiųjų strategijų kūrimo bei tobulinimo srityje (Szabo, Babuška 1991; Lee, Hoobs 1999; Stupak, Baušys 2000; Dobrowolski, Villegas 2005; Belhachmi *et al.* 2005).

Lietuvos mokslininkai taip pat prisidėjo skaitinio modeliavimo ir optimizavimo srityje siekdami išanalizuoti įvairias mechanikos problemas. R. Barauskas, G. Kulvietis pirmieji pradėjo taikyti skaitinius metodus pjezokeitiklių tyrimams. Mokslininkai plačiai taikė baigtinių elementų metodą, sukūrė erdvinį aštuonių mazgų plokštelės tipo bimorfinį asimetrinį pjezoelektrinį baigtinį elementą, kevalo tipo bimorfinį asimetrinį pjezoelektrinį baigtinį elementą bei atliko įvairių pjezokeitiklių sistemų testinius skaičiavimus. Remiantis elektrodų išdėstymo priklausomybėmis, buvo pasiūlytas pjezokeitiklių savųjų dažnių skaičiavimo algoritmas (Барайскас *et al.* 1984; Ragulskis *et al.* 1988; Lietuvos mokslas... 1998).

1976 m. buvo sukurta sistema „VIBRAN“, baigtinių elementų struktūrinių matricų generavimui analitinėmis formomis. Už nuopelnus autoriai 1986 m. gavo TSRS LŪPP bronzos medalį. (Кульветене, Кульветис 1989).

R. Barauskas, G. Kulvietis taikant baigtinių elementų metodą, sudarė vibracinių variklių matematinius modelius, kai kontaktas yra diskretinis arba nepertraukiamas. Jie optimizavo pjezokeitiklių geometrinius parametrus banginio tipo varikliuose, minimizuodami rotoriaus sukimosi netolygumo koeficientą, maksimizavo rotoriaus vidutinį sukimosi greitį. 1978 m. buvo sukurta BEM programa vibrovarikliams modeliuoti. Tačiau tokiam geometrinių parametrų optimizavimo uždaviniui spręsti reikėjo didelių kompiuterinių išteklių. Be to, šis algoritmas turėjo trūkumų, nes skaičiuojant buvo pastebėta, kad dėl pjezokeitiklio savųjų formų sekos pasikeitimų, tikslo funkcija kinta šuoliais ir sprendinys kartais diverguoja.

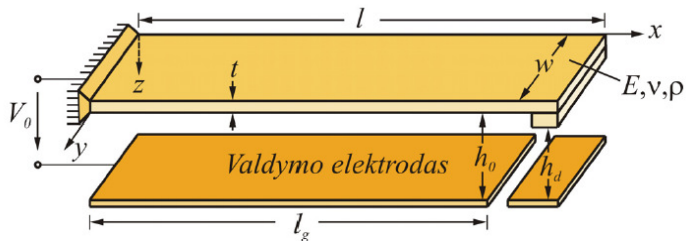
1979 m. sukurti universalūs programiniai paketai pjezokeraminių sistemų skaičiavimui, naudojant BEM su išretintomis matricomis.

Baigtinių elementų metodą plačiai nagrinėjo ir savo moksliniuose tyrimuose taikė R. Barauskas su bendraautoriais (Barauskas, Ostasevičius 1998; Barauskas, Kuprys, Leonavičiūtė 2003; Barauskas, Kačianauskas, Belevičius 2004).

R. Barauskas ir V. Ostaševičius analizavo tampriąsias vibrosmūgines sistemas, jų optimizavimo problemas. Jų dėka buvo sukurti skaitiniai algoritmai, kurie buvo pritaikyti sistemų pereinamiesiems bei periodiniams virpesiams apskaičiuoti. Jie išnagrino sistemų tampriųjų virpesių valdymo uždavinius, atliko pjezokeitiklių vibrosmūginių sistemų skaitinius tyrimus. Mokslininkai naudodami periodinius ir pereinamuosius režimus, skaitiškai tyrė pjezokeitiklių formos optimizavimo uždavinius. Buvo rastos optimalios gembinės sistemos pjezokeitiklių geometrinės formos, atitinkančios apibrėžtus virpesių tipus, minimizuojant struktūros masę (Barauskas, Ostaševičius 1998).

V. Ostaševičius, remiantis sukurtais vibrosmūginių sistemų tampriųjų grandžių dinamikos valdymo pagrindais, sukūrė aibę makro ir mikro elektromechaninių sistemų (MEMS) (Ostaševičius *et al.* 2006).

R. Daukševičius sukūrė matematinius modelius įvertinančius mikrokonstrukcijos sąveiką su supančiu oru, elektrostatiiniu lauku bei pagrindu, kartu vertinant ir mikrolygyje veikiančių tarpmolekulinių traukos jėgų įtaką, kurie yra tinkami įvairių kontaktinių MEMS vykdyklių dinaminių charakteristikų teoriniams tyrimams atlikti (Daukševičius 2007). MEMS sistemos pavyzdys naudojamas dinaminių charakteristikų teoriniams tyrimams atlikti pateiktas 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Tiriamos sistemos, sudarytos iš mikrokonstrukcijos ir ją veikiančio elektrostatiinio lauko, principinė schema (Daukševičius 2007)

Fig. 1.10. The principled scheme of analysed system, composed of microconstruction and affecting electrostatic field

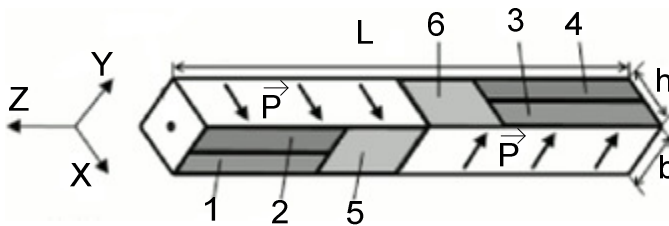
Autonominių mobiliųjų robotų taikomieji moksliniai tyrimai jau daug metų vykdomi kartu su Ukrainos universitetų mokslininkais. Tyrimų sritys apima intelektinius robotų kooperacijos algoritmus, lokalią navigaciją ir evoliucinius klūčių įveikimo kūrimo algoritmus. R. Simutis, A. Sachenko, V. Mačerauskas, V. Galvanauskas, A. Lipnickas, G. Narvydas sukūrė autonominių mobiliųjų robotų orientavimosi ir optimalios trajektorijos planavimo metodus neapibrėžtoje erdvėje naudojantis neraiškiais neuroniniais tinklais (Narvydas, Simutis 2007; Simutis, Narvydas 2008).

G. Kulvietis, A. Busilas naudojant Sobolio taškus, pasiūlė optimalaus elektrodų išdėstymo pjezokeitiklio paviršiuje algoritmą, paremtą atsitiktine žadinimo zonų paieška. Jie sprendė diskreitinį globalinį optimizacijos uždavinį, kurio kriterijais laikomi skenerio energetiniai, funkciniai bei dinaminiai parametrai, t. y. naudingo veikimo koeficientas bei maksimalus pjezokeitiklio atsilenkimo kampinis greitis arba pagreitis. Naudojant šį algoritmą, buvo atlikti plokštelės, žiedo, bei cilindro formos pjezokeitiklių testiniai skaičiavimai. Deja, gauti rezultatai nebuvo pakankamai geri. Skaičiavimo metu gautos elektrodų konfigūracijos buvo netikslios, o ir elektrodų forma sunkiai technologiškai realizuojama, todėl šis algoritmas nebuvo praktiškai pritaikytas. Taikydami

BEM, mokslininkai taip pat nagrinėjo bimorfinius plokštelės ir kryžiaus formos pjezokeitiklius, jų dinaminius procesus.

D. Mažeika nagrinėjo „svyruojančio strypo“ pjezomechaninių sistemų kontaktinio taško įvairiakrypčių virpesių trajektorijas, taikė įvairias elektrodų žadinimo schemas (Mažeika 1999).

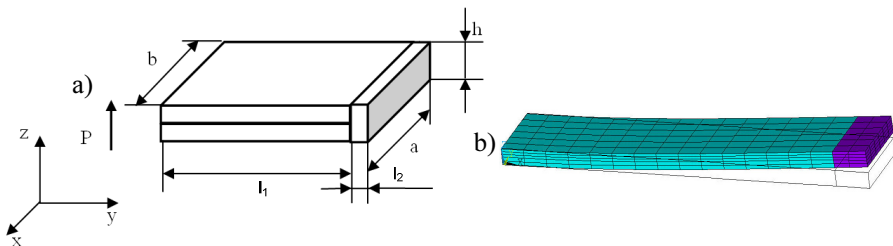
R. Lučinskis, D. Mažeika, T. Hemsel, R. Bansevicius nagrinėjo dvikryptės ir radialinės poliarizacijos strypo formos pjezomechaninių keitiklių įvairiakrypčių virpesių žadinimo problemas, optimizuojant elektrodų topologijas (Lučinskis 2010; Lučinskis 2013). Nagrinėjamas strypo formos pjezokeitiklis su dviem poliarizacijos vektoriais pateiktas 1.11 paveiksle.



1.11 pav. Strypo formos pjezokeitiklis su dviem poliarizacijos vektoriais (Lučinskis 2010, Lučinskis 2013)

Fig. 1.11. Beam-shaped piezotransducer with two vectors of polarisation

D. Mažeika, I. Tumasonienė analizavo papildomai pridėtos masės įtaką strypo formos pjezomechaninio keitiklio kontaktinio taško trajektorijai (Tumasonienė 2009). Nagrinėjamo pjezokeitiklio schema pateikta 1.12 paveiksle.



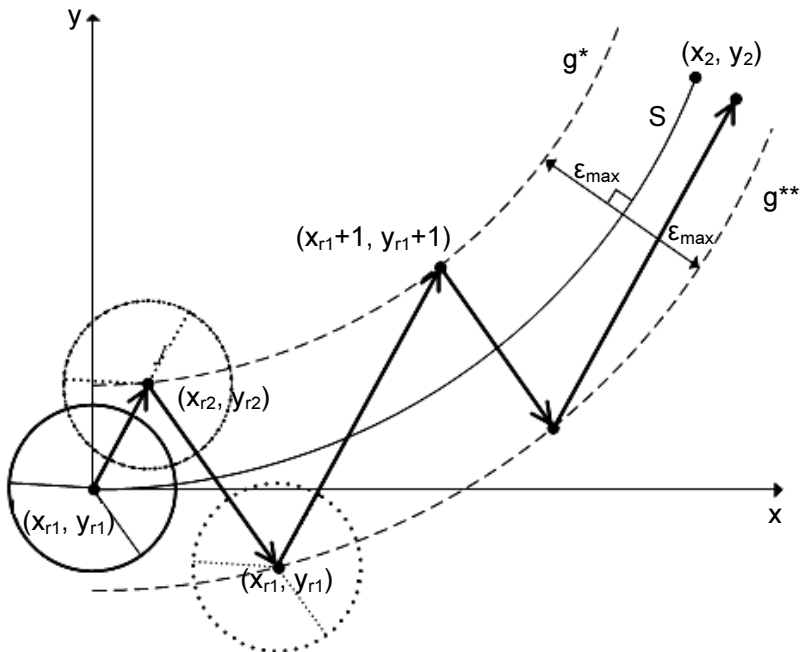
1.12 pav. „Svyruojantis strypas“ su pridėta mase: a) Pagrindinė schema; b) Baigtinis elemento modelis (Tumasonienė 2009)

Fig. 1.12. “Vibratory beam” with attached mass: a) The main scheme; b) Finite model of element

I. Tumasonienė, taikant naują skaičiavimo metodiką, pagrįstą dominavimo koeficientais, sukūrė precizinių mikrorobotų pjezokeitiklių savųjų formų atpažinimo algoritmą, kuris leidžia automatizuoti skaitinius tyrimus (Tumasonienė 2009).

A. Drukteinienė tyrė nanometrines skyros pjezorobotų judesio trajektorijų formavimo algoritmus atsižvelgiant į elektrodų segmentų žadinimo schemas. Savo darbe ji nagrinėjo judesio trajektorijos formavimo algoritmus su integruotais klasikiniiais trajektorijų formavimo metodais planuojant judesio trajektoriją pjezorobotui su tiesioginiais kontaktų taškais, sukūrė naujus precizinių pjezorobotų trajektorijų generavimo metodus, formuojant įvairaus tipo trajektorijas, kurie naudojami žadinant elektrodus skirtingomis elektrodų žadinimo schemomis ir esant įvairiam elektrodų segmentų kiekiui, leidžiančius projektuoti ir analizuoti autonomines sistemas, judančias dviejų dimensijų plokštumoje (Drukteinienė 2011).

Trajektorijų formavimo algoritmo pavyzdinė schema pateikta 1.13 paveiksle.



1.13 pav. Judesio trajektorijos geometrinis formavimas (Drukteinienė 2011)

Fig. 1.13. The geometrical formation of movement trajectory

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Remiantis atlikta mokslinės literatūros analize galima daryti tokius apibendrinimus:

1. Dažniausiai skirtingų geometrinių formų pjezokeitikliuose žadinami skirtingų parametrų virpesiai. Nors pasitaiko atveju, kai tas pačias virpesių charakteristikas galima gauti naudojant skirtingų geometrinių parametrų pjezokeitiklius.
2. Elektrodo išdėstymo forma, plotas ir topologija yra vienas svarbiausių pjezokeitiklių sistemos charakteristikų. Todėl parenkant elektrodo geometrinę formą ir išdėstymo vietas bei keičiant žadinimo įtampos fazę, galima gauti skirtingas pjezokeitiklio rezonansinių virpesių formas ir dažnius.
3. Projektuojant daugiakomponenčių nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių sistemas, daugiakomponenčiai virpesiai gaunami sujungiant skirtingų tipų svyravimus, sukonstruotus taikant vienodo dažnio dviejų virpesių šaltinių rezonansinių formų derinius.
4. Atlikus mokslinės literatūros apžvalgą nustatyta jog plokštuminių ir erdvių nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių, kurie yra taikomi kompleksinėse sistemose, skaitiniai modeliai yra sudėtingi, imlūs skaičiavimo resursams, be to mažai automatizuoti sprendžiant parametrizuotus uždavinius.

Atsižvelgiant į pateiktus apibendrinimus suformuoti pagrindiniai šio darbo uždaviniai:

- Sukurti skaitinio modeliavimo priemonių automatizavimo metodą, kuris palengvins nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių modeliavimą ir leis automatizuoti skaitinius tyrimus.
- Sukurti plokštuminių bei erdvių nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių, kurie bus taikomi kompleksinėse sistemose, skaitinius modelius ir racionalių geometrinių parametrų nustatymo metodiką.
- Atlikti skaitinių tyrimų gautų rezultatų lyginamąją analizę ir pateikti išvadas.

Pjezokeitiklių skaitinio modeliavimo metodų tyrimas

Atliekant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tyrimus, susiduriama su daugeliu mechanikos, medžiagotyros, sistemų valdymo bei informatikos problemų. Kiekviena nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tyrimų kryptis turi savo išskylančias problemas, bei uždavinius jas spręsti.

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių analizė sprendžiant tiesinius uždavinius yra orientuota į vibraciją žadinantį įrenginį, todėl patogiausia pjezokeitiklių tyrimuose uždaviniams spręsti naudoti visą įrenginį. Be to pjezokeitikliai priskiriami sujungtų laukų sistemoms, todėl analizuojant bet kokius nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tiesinius uždavinius, įvertinama mechaninio ir elektrinio laukų tarpusavio sąveika.

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių, kaip ir kitų erdviųjų kontinuumo sistemų, savųjų dažnių spektras yra sudėtingas ir įvairus (Болотин 1978). Žadinant vieno tipo rezonansinius virpesius didėja įtempimų koncentracija bei atsiranda šalutinių virpesių įtaka pjezokeitiklio judesiui. Tai įtakoja skirtingas atstumas tarp atskirų savųjų dažnių spektre bei sudėtingo netiesinio ryšio egzistavimas tarp jų (Avitabile 2008).

Taigi viena iš aktualiausių nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tyrimų uždavinio problemų būtų parinkti fizinius ir geometrinius parametrus bei nustatyti pjezokeitiklių žadinimo zonų konfigūraciją taip, kad žadinami virpesiai

atiktų vieną iš pjezokeitiklio savųjų formų. Tai yra daroma, siekiant tolygiai paskirstyti įtempimus pjezokeitiklyje, t. y. sumažinti įtempimų koncentraciją, bei gauti maksimalias virpesių amplitudes bei pasiekti aukštą pjezokeitiklio naudingumo koeficientą.

Atliekant skaitinius pjezokeitiklių tyrimus, keičiant pjezokeitiklio geometrinius parametrus, susiduriama su problema, kuri susijusi su savųjų formų sekos pasikeitimu. Kadangi vibraciniai įrenginiai paprastai dirba vienu iš savųjų dažnių, tai pasikeitus savųjų formų sekai, uždavinio sprendinys paprastai nekonverguoja ir skaitiniai tyrimai netenka prasmės.

Taigi skaitiškai tiriant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitikius aktualiausias problemos yra susijusios su vibracinių įrenginių ir kontakto zonų kompiuteriniu modeliavimu, matematinio modelio ir skaitinio integravimo tikslumo įvertinimu ir daugeliu kitų uždavinių. Žemiau bus apžvelgti pagrindiniai tiesiniai uždaviniai, kurie naudojami tiriant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitikius.

Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Grigoravičius 2010a; 2010b; 2012; 2013b; 2014).

2.1. Pjezokeitiklių skaitinio modeliavimo uždaviniai

2.1.1. Racionalių geometrinių parametrų optimizacijos uždavinys

Viena iš aktualių problemų, su kuria susiduriama projektuojant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių sistemas yra nustatyti optimalius geometrinius parametrus. Optimizuojant pjezokeitiklio geometrinius parametrus dažniausiai neapsiribojama vien pjezokeitiklio matmenų keitimu. Optimizavimo procesas apima ir tvirtinimo elementų parinkimą, t. y. jų geometrinių formų, išdėstymo vietų optimizavimą.

Ypač svarbi pjezokeitiklių geometrinių parametrų optimizacija yra nagrinėjant rezonansinių virpesių formas, kurios yra charakterizuojamos kaip sudėtingos geometrinės figūros, pavyzdžiui plokštelės, cilindro, žiedo ar kitos geometrijos trimačio pjezokeitiklio daugiakomponenčius virpesius.

Dažniausiai skaičiavimų ciklą pailgina ir komplikuoja pjezokeitiklių geometrinių parametrų optimizacijos uždaviniai sprendžiami neatsiejamai nuo viso vibracinio įrenginio, kuriame jie yra montuojami.

Siekiant supaprastinti sudėtingus skaitinius skaičiavimus, racionalu būtų uždavinį skaidyti į mažesnes dalis, kurios gali būti nesunkiai išspręstos. Vienas iš tokių uždavinių būtų racionalių nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių geometrinių parametrų apskaičiavimas.

Racionalių geometrinių parametru uždavinių formulavimas susideda iš originalaus uždavinio sprendimo algoritmo sukūrimo, sprendimo metodų parinkimo, tikslo funkcijos bei apribojimų nustatymo. Tokio išspręsto uždavinio rezultatai susiaurintų optimalių geometrinių parametru paieškos sritį.

Vėliau apjungiant uždavinio dedamųjų dalių tyrimų rezultatus, galima suformuoti galutinį rezultatą. Toks algoritmas yra priimtinas bei gali būti panaudotas atliekant ir nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių geometrinių parametru optimizavimą.

2.1.2. Savųjų formų atpažinimo uždavinys

Nemažai vibracinių mechanizmų priskiriami rezonansiniams įrenginiams. Paprastai jų darbinis dažnis sutampa su vienu iš pjezokeitiklio savuoju dažniu arba yra artimas jam. Kai vibracinio įrenginio darbinis dažnis neatitinka pjezokeitiklio savojo dažnio, tai gaunama visiškai kita pjezokeitiklių virpesių forma ir tokie įrenginiai praranda savo darbinę paskirtį.

Nagrinėjant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių aukštesnius savuosius dažnius bei juos atitinkančių savųjų formų išsidėstymą dažnių spektre, buvo pastebėta jog prie skirtingų geometrinių matmenų, bet tos pačios geometrinės formos, pjezokeitikliai turi skirtingą savųjų formų seką.

Savųjų formų sekos pasikeitimai vyksta dėl to, kad remiantis savųjų reikšmių uždavinio algoritmu, sistemų savieji dažniai yra išdėstomi didėjimo tvarka. Norint automatizuoti nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitinius tyrimus, sprendžiant optimizacijos uždavinius tokia dažnių rūšiavimo taisyklė yra nepalanki, nes atliekant skaičiavimus, aktualus yra ne tik pjezokeitiklio savasis dažnis, bet ir savoji forma. Dėl tos priežasties būtina skaitiškai atpažinti savąsias formas ir nustatyti jų vietą konstrukcijos modelio savųjų formų matricoje.

2.1.3. Elektrodo konfigūracijos uždavinys

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių patikimumas priklauso nuo medžiagos savybių, pjezokeramikos sluoksnio storio, elektrodo formos bei jų išsidėstymo pjezokeitiklio paviršiuje.

Aktualiausia problema, siekiant padidinti patikimumą yra tolygiai paskirstyti įtempimus pjezokeitiklyje, t. y. žadinimo zonų konfigūraciją. Taip pat nemažą įtaką patikimumui sudaro darbo aplinka įrenginyje, kurioje pjezokeitiklis funkcionuoja. Šios problemos sprendžiamos tobulinant tvirtinimo sąlygas, didinant šilumos išsklaidymo intensyvumą.

Kalbant apie pjezokeitiklių dinamikos gerinimą, pastebėta, jog labai didelę įtaką daro tinkamas elektrodų formos parinkimas bei jų išsidėstymas pjezokeitiklio paviršiuje, kitaip tariant elektrodų arba žadinimo zonų optimali konfigūracija. Pjezokeitiklio mechaninė energija, atvirkštinio pjezoefekto dėka, gaunama transformuojant elektrodais perduodamą srovės šaltinio elektrinę energiją, todėl elektrodų konfigūracija bei žadinimo įtampos dažnis apibrėžia pjezokeitiklyje žadinamų rezonansinių virpesių charakteristikas.

Nanometrines skyros mikrorobotuose naudojamuose pjezokeitikliuose, atsižvelgiant į jų paskirtį, žadinami apibrėžto tipo (išilginiai, lenkimo) pagrindinių arba aukštesniųjų rezonansinių dažnių virpesiai arba jų kombinacijos. Tam pasiekti yra tinkamai parenkama elektrodų konfigūracija, kas yra tolygu tinkamai nustatytiems ekvivalentinių mechaninių jėgų pridėties vietoms.

Optimalių elektrodų formų bei topologijų parinkimo pagrindinis tikslas yra gauti maksimalias virpesių amplitudes, susilpninti nepageidaujamas virpesių formas, o taip pat kuo labiau sumažinti mechaninių įtempimų koncentraciją pjezokeitiklyje.

Tokiais kriterijais remiantis nustatyta žadinimo zonų konfigūracija didina pjezokeitiklio ilgaamžiškumą ir patikimumą. Nagrinėjant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklius, kai kiekvienas taškas turi kelis laisvės laipsnius ir yra sunku įvertinti žadinančių jėgų poveikį virpesių charakteristikoms, elektrodų konfigūracijos optimizacijos uždavinys tampa ypatingai aktualus.

Pasitaiko atvejų, kai pjezokeitiklių žadinimo zonų konfigūracijoms yra keliami specifiniai reikalavimai. Kaip pavyzdį galima paimti uždavinį vibrovariklio sukūrimui, kuriame naudojami elektrodai turi būti išdėstyti taip, jog užtikrintų pjezokeitiklio kontakto zonos taškų judėjimą elipse, bet elektrodų konfigūracija turi turėti galimybę užtikrinti atskirų virpesių komponentų nepriklausomą žadinimą.

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių elektrodų konfigūracijos optimizavimo uždaviniams spręsti, pjezokeitiklio modelio diskretizavimui parenkamas baigtinių elementų metodas, nes jis geriausiai tinka pjezomechaninių sistemų skaitiniam tyrimui. Naudojant baigtinių elementų metodą, išsprendus normalinėse koordinatėse suformuluotas pjezokeitiklio dinamikos lygtis, susiduriama su žadinimo zonų konfigūracijos tikslumo problema, nes elektrodų išdėstymas randamas baigtinių elementų vidutinio ploto tikslumu. Norint padidinti žadinimo zonų konfigūracijos tikslumą, reikia smulkinti baigtinių elementų tinklėlį. To pasekoje reikalingi didesni kompiuteriniai resursai, nes padidėja skaičiavimų apimtis, ir be to iškyla sprendimo konvergavimo klausimai.

2.1.4. Elipsinių trajektorijų formavimo uždavinys

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklio analizėje esant harmoniniam žadinimui, naudojant gautus kontaktinių taškų poslinkius yra formuojamos jų judėjimo elipsinės trajektorijos, kurios padeda įvertinti ar parinkti kontaktiniai taškai juda reikiama kryptimi.

Nagrinėjant žadinamo pagal numatytas elektrodų konfigūracijas, pjezokeitiklio parinktų taškų elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis, įvertinant jų didžiosios ir mažosios ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus, nustatomos didžiausios santykinės reikšmės. Kontaktinių taškų, kurių elipsės turi didesnę didžiąją ašį ir apima didesnę plotą, judėjimas bus aktyvesnis, bei amplitudės pikas, atitinkamai, bus galingesnis. Pagal elipsių sukimosi kampus nustatoma, kuria kryptimi, pagal x , z ir y , z ašių kordinačių sistemą, judės kontaktinis taškas.

2.2. Pjezokeitiklių modeliavimas naudojant baigtinių elementų metodą

Baigtinių elementų metodas yra vienas efektyviausių ir populiariausių inžinerinių įrankių sudėtingoms kompleksinėms struktūroms modeliuoti bei tirti.

Konstrukcijų analizė poslinkių metodu buvo ir tebėlieka itin populiari, todėl baigtinių elementų metodo vystymosi pagrindu tapo mažų poslinkių teorema. Kai konstrukcija turi sudėtingą geometrinę formą bei kraštines sąlygas, analitinis bei eksperimentinis tyrimai tampa techniškai sudėtingi. Atliekant skaitinį tyrimą, kai tiriamas modelis aproksimuojamas baigtinio dydžio elementais, yra efektyvu taikyti baigtinių elementų metodą.

Taikant šį metodą nanometrines skyros mikrorobotų pjezomechaninių sistemų diskretizavimui, galima įvertinti mechaninių ir elektrinių laukų tarpusavio sąveiką.

Be įprastinių mechaninių laisvės laipsnių nanometrines skyros mikrorobotų pjezomechaninių sistemų modeliavimui naudojami baigtiniai elementai, kurie turi papildomą mazginį laisvės laipsnį elektriniam potencialui. Baigtinių elementų metodas naudojamas sprendžiant visus standartinius pjezomechaninius sistemų uždavinius.

Pjezoelektriniam kūnui, užimančiam tūrį V ir apribotam paviršiumi S , gali būti formuluojamos baigtinių elementų metodo lygtys remiantis variaciniu ekstreminiu principu. Pjezoelektrinio kūno pilna potencinė ir elektrostatinė energija, kuri turi sekančią išraišką, gali būti minimizuojama naudojant variacinį ekstreminį principą (Ragulskis *et al.* 1988; Tzou 1993; Daugėla *et al.* 1995; Shi, Atluri 1990):

$$\chi = \frac{1}{2} \int_V \left(\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} - \{E\}^T \{D\} \right) dV - \left[\{u\}^T \{P_c\} + \int_V \{u\}^T \{P_b\} dV + \int_{S_1} \{u\}^T \{P_s\} dS_1 - \int_{S_2} \{\phi\}^T \{Q\} dS_2 \right], \quad (2.1)$$

čia χ – pjezoelektrinio kūno pilna potencinė energija, $\{u\}$ – poslinkių vektorius, $\{\phi\}$ – elektrinių potencialų vektorius, $\{E\}$ – elektrinio lauko vektorius, $\{\sigma\}$ – mechaninių įtempimų vektorius, $\{P_c\}$ – koncentruotų išorinių apkrovų vektorius, $\{P_b\}$ – išorinių tūrinių apkrovų vektorius, $\{P_s\}$ – išorinių paviršinių apkrovų vektorius, $\{Q\}$ – elektrinių krūvių vektorius, S_1 – paviršiaus plotas, kuris yra veikiamas $\{P_s\}$ apkrovos, S_2 – paviršiaus plotas, kuris yra veikiamas elektros krūvio $\{Q\}$.

Naudojant virtualaus darbo principus, pjezoelektrinio kūno vidinių mechaninių bei elektromechaninių jėgų darbas prilyginamas išorinių jėgų darbui, kai kūnas patiria virtualųjį poslinkį $\{\delta u\}$ ir virtualų potencialo pokytį $\{\delta \phi\}$. Tokiu atveju gaunama sekanti lygtis (Барыскас *et al.* 1984):

$$\int_V \left(\{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} - \{\delta E\}^T \{D\} \right) dV = \{ \delta u \}^T \{ P_c \} + \int_V \{ \delta u \}^T \{ P_b \} dV + \int_{S_1} \{ \delta u \}^T \{ P_s \} dS_1 - \int_{S_2} \{ \delta \phi \}^T \{ Q \} dS_2. \quad (2.2)$$

Yra teigiama jog virtualių darbų ir variacinio ekstreminio principų atvejais yra gaunamos tos pačios baigtinių elementų lygčių išraiškos, nes jie matematiniai požiūriu yra ekvivalentiški.

Remiantis bendrąja baigtinių elementų poslinkių metodo schema, poslinkių vektorius $\{u\}$ ir elektrinis potencialas ϕ bet kuriame pjezoelektrinio kūno taške išreiškiamas baigtinio elemento mazginiais kintamaisiais (Болотин 1978; Barauskas 1992; ANSYS 10.0; Allik, Hugdes 1970):

$$\{u\} = [N_u] \{u^e\}, \quad (2.3)$$

$$\phi = [N_\phi] \{\phi^e\}, \quad (2.4)$$

čia $[N_u]$, $[N_\phi]$ – atitinkamos poslinkių ir elektrinio potencialo formos funkcijų matricos. Deformacijų vektorius $\{\varepsilon\}$ yra randamas kaip poslinkių vektoriaus $\{u\}$ pirmoji išvestinė. Elektrinio lauko vektorius $\{E\}$ yra apibrėžiamas kaip elektrinio potencialo gradientas (Болотин 1978; Barauskas 1992; ANSYS 10.0; Allik, Hugdes 1970):

$$\{E\} = -\nabla \phi. \quad (2.5)$$

Išreiškus deformacijų ir elektrinio lauko vektorius mazginiais kintamaisiais, gaunamos tokios lygtys (Болотин 1978; Barauskas 1992; Bathe, Wilson 1976; Ragulskis *et al.* 1988; Allik, Hughes 1970):

$$\{\varepsilon\} = [B_u] \{u^e\}, \quad (2.6)$$

$$\{E\} = -[B_\phi] \{\phi^e\}, \quad (2.7)$$

čia $[B_u]$, $[B_\phi]$ – atitinkamos formos funkcijų išvestinių matricos, apibūdinančios elemento mechanines deformacijas ir elektrinį lauką. Minėtos matricos gali turėti tokias išraiškas (Bathe, Wilson 1976; Bathe 1978; Cook 2001; Zienkiewicz, Taylor 1967; Зенкевич 1975):

$$[B_u] = [a_u][N_u] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} [N_u], \quad (2.8)$$

$$[B_\phi] = \nabla [N_\phi] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} [N_\phi]. \quad (2.9)$$

Bendru atveju kraštines sąlygas tam tikrose pjezoelektrinio kūno vietose ir paviršiaus srityse apibrėžia mechaniniai paviršiniai įtempimai, poslinkiai, potencialai bei elektriniai krūviai. Gan dažnai tyrimuose mechaninės apkrovos ir elektriniai krūviai laikomi koncentruotomis mazginėmis apkrovomis. Todėl pakanka nagrinėti kraštines sąlygas, kurios nusakomos tam tikrais poslinkiais ir

potencialais. Tokios kraštinės sąlygos yra taikomos apskaičiuojant virpesius, sužadintus paveikus pjezokeitiklio elektrodus kintamu elektriniu signalu.

Norint gauti pjezoelektrinio baigtinio elemento būvio lygtis reikia pritaikyti potencinės ir elektrostatinės energijos minimumo principą (Болотин 1978; Barauskas 1992; Tzou 1993; ANSYS 10.0):

$$\begin{cases} [K^e] \{u^e\} + [T^e] \{\phi^e\} = \{F^e\} \\ [T^e]^T \{u^e\} - [S^e] \{\phi^e\} = \{Q^e\} \end{cases} \quad (2.10)$$

čia $[K^e]$, $[T^e]$, $[S^e]$ yra atitinkamos elemento standumo, elektromechaninė ir talpinė matricos; $\{F^e\}$, $\{Q^e\}$ – išorinių mazginių apkrovų ir elektros krūvių vektoriai. Minėtos matricos ir vektoriai turi tokias išraiškas (Tzou 1993; Sashida, Toshiiku 1993; Zienkiewicz, Taylor 1967):

$$[K^e] = \int_V [B_u]^T [c^E] [B_u] dV, \quad (2.11)$$

$$[T^e] = \int_V [B_u]^T [e] [B_\phi] dV, \quad (2.12)$$

$$[S^e] = \int_V [B_\phi]^T [\varepsilon^E] [B_\phi] dV, \quad (2.13)$$

čia $[c^E]$, $[\varepsilon^E]$, $[e]$ – atitinkamai tamprumo matrica, esant pastoviam elektrinio lauko stiprumui, dielektrinių konstantų matrica, esant pastoviai mechaninei deformacijai, pjezoelektrinių konstantų matrica.

Globalinės sistemos matricos turi analogiškas išraiškas, kaip ir lygtys (2.10–2.13). Pjezokeitiklio dinamikos lygtis matriciniame pavidale įgyja tokią išraišką (Болоти 1978; Barauskas 1992; Tzou 1993; ANSYS 10.0):

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{\phi}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{\phi}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [T] \\ [T]^T & -[S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix}, \quad (2.14)$$

čia $[M]$, $[C]$ – atitinkamos konstrukcijos masių ir slopinimo matricos. Šios matricos apibrėžiamos taip (Barauskas, Ostasevičius 1998; Žiliukas, Barauskas 1997; Tzou 1993; Allik, Hugdes 1970):

$$[M] = \rho \int_V [N_u]^T [N_u] dV, \quad (2.15)$$

$$[C] = \gamma [M] + \delta [K], \quad (2.16)$$

čia ρ – medžiagos tankis; γ ir δ – proporcingumo koeficientai.

Bendru atveju nevertinant slopinimo, pjezokeitiklio savosios formos ir savieji dažniai gali būti gaunami išsprendus matricinių lygčių sistemos (2.17, 2.18) savųjų reikšmių uždavinį:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} + [T]\{\phi\} = \{0\}, \quad (2.17)$$

$$[T]^T\{u\} - [S]\{\phi\} = \{0\}. \quad (2.18)$$

Savųjų reikšmių lygtis gaunama pertvarkius lygtis (2.17) ir (2.18) (Cook 2001; Tzou 1993; Allik, Hugdes 1970; Qiu *et al.* 1994):

$$([K^*] - \omega^2 [M])\{u\} = \{0\}. \quad (2.19)$$

Kadangi lygtis (2.19) turi du sprendinius, kurie gali būti lygūs nuliui, netrivialus sprendinys gaunamas išsprendus lygtį (Bathe, Wilson 1976; Bathe 1982; Lewandowski 1997; Kardestuncer, Norie 1987):

$$\det([K^*] - \omega^2 [M]) = \{0\}, \quad (2.20)$$

čia $[K^*]$ matricos išraiška priklauso nuo mazginių potencialų vektorius reikšmių, kurias įtakoja elektrodų konfigūracija. Matricą $[K^*]$ galima apibrėžti dviem galimais bendrais elektrodų išdėstymo atvejais. Pirmasis atvejis, kai pjezokeitiklis pilnai padengtas elektrodais ir visi mazgai turi nenulines elektros krūvio reikšmes, antrasis atvejis – kai vidiniai mazgai ir pjezokeitiklio paviršiaus elementų, nepadengtų elektrodais, mazgai, turi nulinių elektros krūvi. Pirmuoju atveju gaunama tokia $[K^*]$ matricos išraiška (Ragulskis *et al.* 1988):

$$[K^*] = [K] + [T][S]^{-1}[T]^T. \quad (2.21)$$

Naudojant antrąjį atvejį, pjezokeitiklio mazginių potencialų vektorius $\{\phi\}$ padalinamas į du mazginių potencialų subvektorius: su nenuliniais elektros krūviais $\{\phi_1\}$ ir nuliniiais elektros krūviais $\{\phi_2\}$, įskaitant, elektrodų neturinčius, paviršinius mazgus. Įvertinus mazginių potencialų vektorius padalijimą, elektrinių krūvių vektorius $\{Q\}$ yra skaidomas į užduotą nenulinių krūvių subvektorių $\{Q_1\}$ ir nulinių krūvių subvektorių $\{Q_2\}$, kuris apibrėžia nepadengtas elektrodais pjezokeitiklio dalis. Tuomet elektromechaninė ir talpinė matricos į atitinkamus blokus ir turi tokias išraiškas:

$$[T] = [T_1 \quad T_2], \quad (2.22)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Šiuo atveju $[K^*]$ matricos išraiška, esant trumpam jungimui elektroduose ($\phi_l = 0$), turi tokią išraišką (Болотин 1978; Barauskas 1992):

$$[K^*] = [K] + [T_2][S_{22}]^{-1}[T_2]^T. \quad (2.24)$$

Matricos $[K^*]$ išraiška gali būti tokia pati kaip ir (2.21) tuo atveju, kai pjezokeitiklio elektrodai atviri ($Q_l = 0$), nes tada mazginių potencialų vektorius skaidymas į subvektorius netenka prasmės. (2.24) išraiškoje standumo matricos $[K]$ norma žymiai viršija antrojo nario, t. y. matricų sandaugos, matricos normą ir mažai įtakoja savųjų dažnių skaičiavimuose, tačiau vertinant skaičiavimų tikslumą šio nario ignoruoti negalima. Savųjų reikšmių uždavinio sprendime gauti pjezokeitiklio savieji dažniai ir savosios formos yra naudojami tolesniuose skaičiavimuose.

Taikant baigtinių elementų modelius realiai veikiantiems pjezokeitikliams, vidiniams mazgams ir elektrodais nepadengtiems paviršiniais mazgams priskiriamas nulinis elektros krūvis. Modeliuojant tokius pjezokeitiklius, yra naudojamos šiame skyriuje aukščiau nagrinėtos pergrupuotos struktūrinės matricos ir vektoriai. Tokios kraštinės sąlygos kaip: įtvirtinimo mazuose poslinkiai lygūs nuliui $\{u_s\} = 0$ ir mazginių apkrovų vektorius lygus nuliui $\{F\} = 0$ dažnai taikomos tokiems pjezokeitikliams. Todėl dažniausiai naudojama įprastinio pavidalo dinamikos lygtis su duotu mazginių jėgų vektoriumi dešinėje pusėje (Барайцкас *et al.* 1984; Barauskas, Ostasevičius 1998; Barauskas 1992):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[T_1]\{\phi_1\} - [T_2]\{\phi_2\}. \quad (2.25)$$

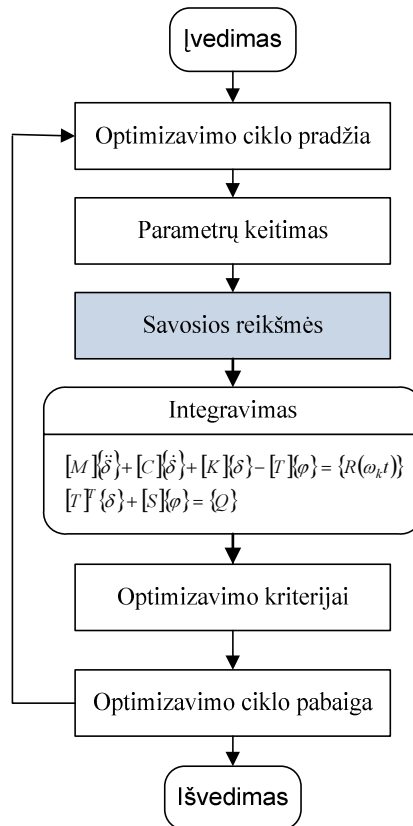
Sistemoje (2.25) esantys nariai $[T_1]\{\phi_1\}$ ir $[T_2]\{\phi_2\}$ reiškia ekvivalentines mazgines jėgas, sąlygotas potencialų $\{\phi_1\}$ ir $\{\phi_2\}$. Tokio pavidalo pjezokeitiklio dinamikos lygtis yra paprastai naudojama nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaičiavimuose.

2.3. Racionalių geometrinių parametrų nustatymas pjezokeitikliuose

Racionalių geometrinių parametrų uždavinį sudaro skaitinių sprendimo metodu apibrėžimas, dydžių, kurie gali būti uždavinio optimizavimo kriterijais, nustatymas bei apribojimų parinkimas.

Šiame darbe bus naudojami tik nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių savųjų reikšmių tyrimų rezultatai, racionalių geometrinių

parametrų paieškai. Toks sprendimo būdas žymiai sumažina skaičiavimų ciklą, nes nereikia atlikti nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklio dinamikos lygčių integravimo, kuris paprastai yra neatsiejama ciklo dalis, sprendžiant įprastinius geometrinių parametrų optimizacijos uždavinius. Pilna geometrinių parametrų optimizacijos uždavinių schema pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Racionalių geometrinių parametrų nustatymo schema (Tumasonienė 2009)
 Fig. 2.1. Establishment scheme of rational geometrical parameters

Plokštuminių pjezokeitiklių optimalius geometrinius parametrus galima rasti analitiškai, todėl racionalių geometrinių parametrų uždavinys yra sprendžiamas tik nagrinėjant erdvinius pjezokeitiklius. Reikėtų pabrėžti, jog tai įmanoma su sąlyga, kad strypo daugiakomponenčių virpesių atskiros komponentės yra izoliuotos.

2.3.1. Plokštuminių pjezokeitiklių racionalių geometrinių parametų radimas

Patys paprasčiausi ir plačiausiai naudojami daugiakomponenčių virpesių pjezokeitikliai yra dvimatės plokštelės. Tokių pjezokeitiklių poliarizacijos vektorius dažniausiai yra nukreiptas plokštelės storio kryptimi. Juose galima sužadinti išilginius, lenkimo, sukamuosius bei skersinius virpesius.

Be visų minėtų tipų virpesių, tokiuose vibraciniuose pjezokeitikliuose gali būti žadinamos ir įvairios jų kombinacijos, t. y. daugiakomponenčiai virpesiai. Projektuojant dvimatės plokštelės formos pjezokeitiklių sistemas, daugiakomponenčiai virpesiai gaunami sujungiant skirtingų tipų svyravimus, sukonstruotus taikant vienodo dažnio dviejų virpesių šaltinių rezonansinių formų derinius: lenkimo – lenkimo, išilginių (radialinių) – lenkimo, radialinių – išilginių, lenkimo – sukimo, išilginių – sukimo. Daugiakomponenčiai virpesiai taip pat gali būti generuojami kaip frikcinės poros sąveikos kontakto zonoje rezultatas. Apibendrinant, pjezokeitlikio judesio trajektorija priklauso nuo atskirų virpesių komponentų dažnių, amplitudės ir fazės santykio.

Plačiau plokštuminių pjezokeitiklių racionalių geometrinių parametų radimą naudojant diferencialines lygtis savo darbe nagrinėjo I. Tumasonienė (Tumasonienė 2009).

2.3.2. Erdvinių pjezokeitiklių racionalių geometrinių parametų radimas

Dviejų arba trijų laisvės laipsnių nanometrinės skyros mikrorobotų pjezokeitiklių atveju racionalių geometrinių parametų radimo problema tampa dar sudėtingesnė, nes bet kuris sistemos taškas turi keletą laisvės laipsnių.

Erdviniai nanometrinės skyros mikrorobotų pjezokeitikliai neturi apibrėžtų virpesių tipų, tokių kaip dvimatėje plokštelėje: išilginių, sukamųjų bei skersinių. Uždavinio sprendimą taip pat apsunkina rezonansinių virpesių ribos persidengiamumas amplitudės dažninėje charakteristikoje.

Taip pat verta paminėti, jog erdvinių nanometrinės skyros mikrorobotų pjezokeitiklių virpesių negalima laikyti izoliuotais ir dėl šios priežasties nagrinėti juos kaip atskirų virpesių tipų superpoziciją.

Erdvinių nanometrinės skyros mikrorobotų pjezokeitiklių racionalių geometrinių parametų uždaviniui suformuluoti nagrinėjamas pavyzdys, banginio tipo vibrovariklis, kuriame yra sumontuotas cilindro formos pjezokeitlikis. Parenkame vibrovariklio konstrukcijos ypatumus taip, kad jo darbinis dažnis sutaps su vienu iš pjezokeraminio cilindro savųjų dažnių. Jei pasirinktame cilindro formos vibrovariklyje dominuoja radialinė virpesių forma,

tai tokiu atveju nuo cilindro taškų poslinkio tangentine bei ašine kryptimis priklauso ne tik vibrovariklio greitis, bet ir bendras jo darbingumas. Taip pat verta paminėti, jog kelių laisvės laipsnių vibrovarikliai gali dirbti keliais rezonansiniais dažniais. Bet šie teiginiai galioja kiekvienam laisvės laipsniui atskirai.

Atsižvelgiant į nagrinėjamą pavyzdį, pjezokeitiklio savųjų dažnių tankis gali būti parinktas kaip racionalių geometrinių parametru uždavinio efektyvumo kriterijus. Šis tankis turi būti maksimizuotas $\tilde{v}(\omega) \Rightarrow \max$ apibrėžtame dažnių intervale. Priklausomai nuo pjezokeitiklio geometrinės formos, optimizuojami parametrai gali būti pjezokeitiklio geometriniai dydžiai: ilgis l , plotis b , aukštis h , spindulys R ir kiti.

Dažniausiai galima teigti jog nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių racionalių geometrinių parametru radimo uždavinys turi neišreikštinę tikslo funkciją ir bendru atveju yra priskiriamas prie besąlyginių diskretinės optimizacijos uždavinių.

Žinoma, atskirais atvejais, kai pjezokeitiklio geometrinė forma yra apibrėžiama remiantis tam tikrais teoriniais teiginiais ar konstrukcinėmis prielaidomis, galima nustatyti apribojimus valdantiesiems parametrams.

Plačiau erdvinių pjezokeitiklių racionalių geometrinių parametru radimo uždavinio algoritmus ir metodus savo darbe nagrinėjo D. Mažeika (Mažeika 1999).

2.4. Pjezokeitiklių savųjų formų atpažinimas naudojant dominavimo koeficientus

Skyriaus pradžioje formuojant savųjų formų atpažinimo uždavinį minėta, jog tiriant nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklius, pastebėta, kad tos pačios geometrinės formos, bet skirtingų matmenų pjezokeitikliai turi skirtingą savųjų formų išsidėstymą dažnių spektre, t. y. pasikeitusią savųjų formų vietą jų eilėje. Tyrimų eigą komplikuoja ir skirtingų virpesių dažnių sričių persidengiamumas. Šią problemą pastebėjo Genadijus Kulvietis ir 1993 m. pasiūlė šios problemos sprendimą. Toliau apžvelgiamas problemos sprendimas.

2.4.1. Savųjų formų atpažinimas naudojant parcialinius dominavimo koeficientus

Sprendžiant savųjų reikšmių uždavinį, turimi apskaičiuoti konstrukcijos savieji dažniai ir formos. Tada n -tajam savajam dažniui galima sudaryti tokio pavidalo sumą (Tumasonienė 2009):

$$S_k^n = \sum_{i=1}^r (A_{ik}^n)^2, \quad R = \frac{L}{k}, \quad (2.26)$$

čia k – laisvės laipsnių skaičius mazge; L – mazgų (laisvės laipsnių) skaičius modelyje; R – formos vektoriaus dydis k -tajai koordinatei; A_{ik}^n – i -tojo elemento savosios formos vektoriaus reikšmė. Toliau suformuojamas santykis (Tumasonienė 2009):

$$m_{jk}^n = \frac{S_j^n}{S_k^n}, \quad j \neq k, \quad (2.27)$$

čia m_{jk}^n – virpesių dominavimo koeficientas.

Virpesių dominavimo koeficiento fizikinė prasmė būtų virpesių dydžių proporcingų energijai dedamųjų sistemos koordinačių kryptimis santykis. Suma S_k^n atitinka n -tojo savojo dažnio virpesių dydžių proporcingų energijai k -aja kryptimi, o santykis m_{jk}^n – n -tojo savojo dažnio virpesių dydžių proporcingų energijai koordinatinėmis kryptimis j ir k santykį. Dominavimo koeficientą galima aprašyti tokia lygybe (Tumasonienė 2009):

$$m_{kj}^n = \frac{1}{m_{jk}^n}, \quad j \neq k. \quad (2.28)$$

Apie dominuojančių virpesių tipą galima spręsti remiantis dominavimo koeficientų reikšmėmis. Jei n -tasis savasis dažnis turi dominuojančias amplitudes j kryptimi, kur j atitinka koordinatės numerį, tai galioja lygybė (Tumasonienė 2009):

$$m_{jk}^n = \tau. \quad (2.29)$$

Virpesių dydžių proporcingų energijai dedamųjų sistemos koordinačių kryptimis, koreliaciją šioje lygybėje charakterizuoja dydis τ . Pjezokeitiklio virpesių dominavimo stiprumas bei savųjų dažnių koreliacijos laipsnis randamas naudojant dydžio τ logaritmą. Priklausomai nuo keliamų reikalavimų, τ gali įgyti tokias reikšmes (Tumasonienė 2009):

$$\lg \tau = 1, 2, 3 \dots \quad (2.30)$$

Parcialiniai dominavimo koeficientai turi tokių trūkumų:

- Jie nėra normuoti. Dėl šios priežasties gaunamų dominavimo koeficientų kitimo ribos yra nuo 0 iki begalybės.
- Jie įvertina energiją tik dviejų koordinačių kryptimis.

- Trimačiu atveju gaunami šeši dominavimo koeficientai ir toks koeficientų skaičius jau apskunkina analizės procesą.

Todėl universaliau yra naudoti globalinius dominavimo koeficientus, kurie padengia aukščiau minėtus trūkumus.

2.4.2. Savųjų formų atpažinimas naudojant globalinius dominavimo koeficientus

Savųjų formų atpažinimas naudojant globalinius dominavimo koeficientus naudoja tokį algoritmą: Pirmiausia randama pjezokeitiklio virpesių amplitudžių kvadratų visomis taško laisvės laipsnių kryptimis suma, t. y. randama pilnutinė sistemos energija visomis kryptimis (Tumasonienė 2009):

$$S_k^n = \sum_{i=1}^r (A_{ik}^n)^2, \quad (2.31)$$

čia n -tasis savasis sistemos dažnis; k – laisvės laipsnių skaičius mazge; A_{ik}^n – i -tojo elemento savosios formos vektoriaus reikšmė. Tada reikia apskaičiuoti santykius (Tumasonienė 2009):

$$m_j^n = \frac{S_j^n}{\sum_{i=1}^k S_i^n}, \quad (2.32)$$

čia m_j^n – virpesių dominavimo koeficientas, atitinkantis n -tąją savąją formą.

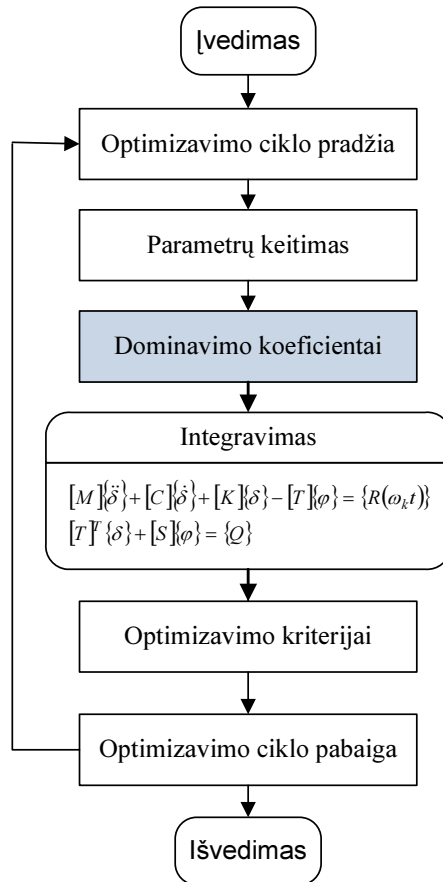
Dominavimo koeficientų indeksas j rodo, kuria kryptimi tiriama energija yra didžiausia ir jis gali įgyti tokias reikšmes: 1 atitinka X koordinatę, 2 – Y , o 3 – Z .

Dominuojantis virpesių tipas nustatomas apskaičiavus dominavimo koeficientus visomis laisvės laipsnių kryptimis ir palyginus juos tarpusavyje. Dominavimo koeficientai, apskaičiuoti pagal (2.32) formulę, yra sunormuoti, o dominavimo koeficientas įgyja nuo 0 iki 1 reikšmes.

Toks dominuojančių virpesių nustatymo metodas yra patogus ir efektyvus, norint atlikti lyginamąją analizę. Dominavimo koeficientų naudojimas leidžia parinkti reikiamą savąjį dažnį taip sumažindamas optimizavimo ciklo kartojimų skaičių.

Atliekant pasikartojančius skaičiavimus su aukštesniaisiais savaisiais dažniais, sprendžiant nanometrinės skyros mikrorobotų pjezokeitiklių dinamikos uždavinius, savųjų formų atpažinimui bus naudojami dominavimo koeficientai.

2.2 paveiksle pateikta jų vieta optimizavimo ciklo schemeje.



2.2 pav. Racionalių geometrinų parametrų nustatymo schema (Tumasonienė 2009)

Fig. 2.2. Establishment scheme of rational geometrical parameters

Svarbu pabrėžti jog naudojant dominavimo koeficientus yra tik atskiriamos savosios formos pagal dominuojančius virpesius – radialinius, tangentinius, ašinius ir vienareikšmiškai atpažinti savąją formą ir jos vietą konstrukcijos modelio savųjų formų matricioje, jų apskaičiuoti neužtenka.

Todėl savųjų formų atpažinimo procese reikia naudoti papildomą kriterijų, individualų kiekvienai savajai formai. Tokiu kriterijumi priklausomai nuo savosios formos matiškumo, gali būti mazginių formos taškų arba mazginių linijų skaičius.

2.5. Pjezokeitiklių elipsinių kontaktinio taško judesio trajektorijų nustatymas

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių sistemų veikimas paremtas smūginio kontakto principu tarp judančios ir nejudančios sistemos dalių. Smūgio metu statoriaus virpesių energija perduodama slankikliui ar rotoriumi, todėl jis pradeda judėti.

Pagrindinė tokios sistemos veikimo sąlyga – elipsinė kontaktinio taško judesio trajektorija, kuri paprastai gaunama taikant virpesių modų superpozicijos arba perstumtos žadinimo signalo fazės principus (Vasiljev *et al.* 2003).

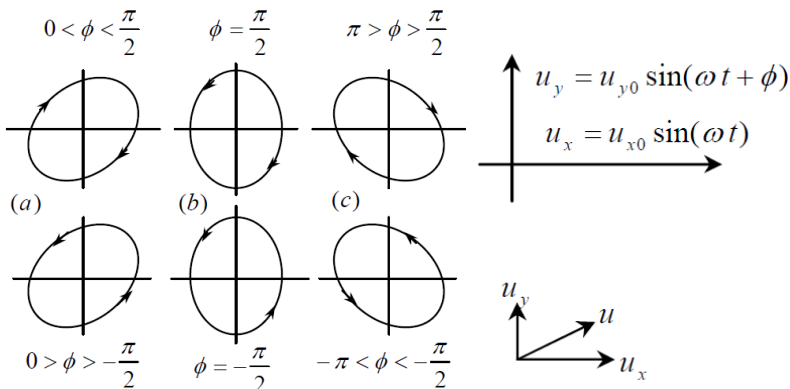
Pjezokeitiklio išėjimo grandies taškų elipsės trajektorija yra aprašoma poslinkiais.

Judėjimas elipsės trajektorija galimas tik esant fazių skirtumui ($\varphi \neq 0$) tarp u_x ir u_y poslinkiu (2.3 pav.). Tuo atveju, kai kampas tarp fazių lygus nuliui ($\varphi = 0$), gaunamas linijinis judėjimas.

Judėjimas elipse pjezokeitiklio išėjimo grandyje gaunamas formuojant tarpusavyje statmenus vertikalius ir horizontalius poslinkius u_x ir u_y , kurių dydis valdomas skirtingų fazių elektriniais signalais.

Iš to seka, kad atsižvelgiant į judesio žadinimo būdus, galima sukurti įvairių formų judesio trajektorijas.

Elipsės trajektorija gali būti formuojama įvairiais būdais. Ultragarsiniuose varikliuose gali būti naudojami pjezokeitikliai generuojantys virpesius pasitelkdami vieną iš dviejų principų: stovinčios bangos ir bėgancios bangos.



2.3 pav. Pjezokeitiklio išėjimo grandies elipsinės trajektorijos formavimas (Lučinskis 2014)

Fig. 2.3. Formation of elliptical trajectory of piezoactuator output link

Stovinti banga išreiškiama:

$$u(x, t) = A \cos mx \cos \omega t, \quad (2.33)$$

tuo tarpu bėganti banga išreiškiama:

$$u(x, t) = A \cos(mx - \omega t). \quad (2.34)$$

Naudojant kampų skirtumo kosinuso išraišką, lygtį (2.34) galima pakeisti į:

$$u(x, t) = A \cos mx \cos \omega t + A \cos\left(mx - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.35)$$

čia A – išorinių žadinimo jėgų amplitudė, ω – kampinis virpesių dažnis, t – laikas, m – banginis skaičius.

Tai leidžia daryti išvadą, kad bėgančią bangą galima sužadinti sudedant dvi stovinčias bangas, kurių fazė skiriasi $\pi/2$ tiek laiko, tiek erdvės atžvilgiu. Šis principas būtinas, norint sužadinti stovinčią bangą riboto dydžio medžiagos paviršiuje, nes riboto dydžio standžioje terpėje galima sužadinti tik stabilias stovinčias bangas (Lučinskis 2014).

Atsižvelgiant į virpesių konceptoriaus konstrukciją, mechaniniams virpesiams žadinti sistemoje naudojamos pjezokeraminių plokštelės tipo elementų kampinės deformacijos arba pjezoelementų paketo linijinės deformacijos.

Žiedo, cilindro bei disko formos pjezokeitiklio veikimas taip pat grindžiamas tokiu pačiu principu. Šiuo atveju elipsinės kontaktinio taško trajektorijos gaunamos panaudojus žiedo, cilindro arba disko lenkimo virpesius, kurie sužadinami pjezokeraminio elemento kampinėmis deformacijomis. Tokios sistemos įgalina generuoti slankiklio judesį bet kuria kryptimi plokštumoje. Sužadinus priešpriešiais esančius pjezoelemento elektrodus rezonansinio dažnio įtampa, kurių fazės skiriasi $\pi/2$, sužadinamos vediklio elipsinės virpesių trajektorijos (Vasiljev *et al.* 2007).

2.6. Pjezokeitiklių skaitinio modeliavimo automatizavimas

Suformuoti skaitinio modeliavimo uždaviniai buvo pradėti spresti baigtinių elementų metodo programiniu paketu ANSYS 10 naudojant standartines priemones iš įrankių medžio.

ANSYS pasirinkimą lėmė, nes tai visame pasaulyje gerai žinoma ir įvairiose pramonės ir gamybos srityse plačiai naudojama programinė įranga, skirta inžineriniams uždaviniams modeliuoti. Ši programinė įranga turi visus netiesinės bei tiesinės struktūros pajėgumus, skaičiavimams suteikiančius aukščiausią

kokybę bei itin patikimus konstrukcijų simuliacijos rezultatus. ANSYS modeliavimo baigtiniais elementais sistemos leidžia globaliai nagrinėti projektuojamą objektą, sukuriant produkto ir jo darbinės terpės skaitinį modelį. Naudojant ANSYS programinius paketus, nuo pat pirminio projektavimo iki galutinio testavimo dauguma inžinerinių problemų sprendžiamos greitai ir efektyviai. Programos suteikia inžinieriams ir analitikams pilną spektrą inžinerinio dizaino analizavimo ir optimizavimo funkcijų, įskaitant modeliavimą ir elementų suderinimą, grafines ir dizaino optimizavimo savybes.

Modeliuojant pirmą pakankamai nesudėtingą modelį naudojant standartinės ANSYS priemonės modeliavimo darbai gerokai užtruko, t. y. reikiamų priemonių radimas įrankių medyje, medžiagų savybių aprašymai, braižymo darbai, tinklelio parinkimas ir t. t. Vėliau gautų skaitinio modeliavimo rezultatų apdorojimas iš failų, matematinių formulių taikymas jiems. Toks darbo principas tiktų jei reikėtų modeliuoti kelis modelius.

Šiame darbe reikėjo ištirti kelias nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių sistemas. Kiekvienai sistemai parinkti racionalius geometrinius parametrus, ištirti skirtingų baigtinių elementų tipų bei baigtinių elementų tinklų įtaką modeliams, rasti savuosius dažnius, bei savasias formas, ištirti kontaktinių taškų elipsines trajektorijas. Todėl buvo nuspręsta nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių sistemų skaitinio modeliavimo uždavinius spręsti kompleksiskai, bei kuo labiau automatizuoti tyrimų procesus.

Pirmiausiai buvo pakeistas skaitinio modeliavimo vykdymas ANSYS programiniame pakete. Standartinių priemonių naudojimą įrankių medyje nutarta pakeisti skriptais. ANSYS komandų skriptai įgalino lengvai keisti modelio geometrinius parametrus, parinkti skirtingas baigtinių elementų savybes ir taip greičiau gauti skaitinio modeliavimo rezultatus. Naudojant sukauptas skriptų kūrimo žinias, buvo sukurtas skriptų generatorius, kuris įgalino nesudėtingus skriptus generuoti dinamiškai paduodant prašomus parametrus, vėliau jas papildant komandomis, kurių generatorius kolkas nekuria.

Tolimesnis skaitinių tyrimų automatizavimas vyko ties skaitinio modeliavimo rezultatų apdorojimu. Kandangi net pakankamai nesudėtingos nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių sistemos skaitinio modeliavimo rezultatų failai apiimdavo kelias dešimtis tūkstančių eilučių, buvo nuspręsta jas saugoti, apdoroti, taikyti matematinės formules ir atlikti galutinius skaičiavimus duomenų bazėje.

Atsižvelgiant į gamintojo pasaulinį pripažinimą, duomenų bazės stabilumą ir galimybes, bei turimas žinias, duomenims apdoroti buvo pasirinktas Oracle Database 11g Express Edition produktas.

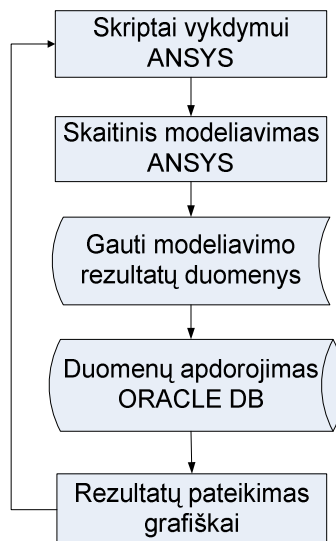
Atsižvelgiant į pakraunamų skaitinio modeliavimo rezultatų struktūrą, buvo sukurtas reliacinis duomenų modelis atitinkantis trečią normalinę formą. Užklausų vykdymo optimizavimui buvo sukurti atitinkami indeksai. Skaitinio

modeliavimo rezultatų perkėlimui iš failų į duomenų bazę buvo sukurtos duomenų importavimo priemonės.

Matematinų formulių skaičiavimai buvo realizuojami per procedūras ir funkcijas, kurios buvo logiškai patalpintos paketuose. Procedūrų, funkcijų, paketų realizacija buvo vykdoma naudojant PL/SQL developer priemonę. Užklausoje buvo stengiamasi naudoti deterministines (angl. *deterministic*) funkcijas. Jų privalumas tas, jog funkcijai paduodant tas pačias parametrų reikšmes funkcija grąžina jau paskaičiuotą rezultatą prieš tai, taip taupydama laiką ir resursus, pakartotinai nevykdant kūne esančių skaičiavimų su tomis pačiomis reikšmėmis.

Jei gauti skaičiavimo rezultatai netenkina keliamų techninių reikalavimų, buvo vykdomas pakartotinis skaitinis modeliavimas, suvedant naujas parametrų reikšmes ir perkuriant ANSYS skriptus.

Gauti galutiniai skaičiavimų rezultatai yra atvaizduojami grafiškai ir pateikiami sekančiuose skyriuose. Žemiau yra pateikiama automatizuoto skaitinio modeliavimo vykdymo schema.



2.4 pav. Automatizuoto skaitinio modeliavimo vykdymo schema
Fig. 2.4. The scheme of automated execution of numerical modelling

Disertacijoje pasiūlytas skaitinio modeliavimo priemonių automatizavimas žymiai palengvino skaitinio tyrimo darbą, eliminuodamas standartinių priemonių naudojimą iš įrankių medžio ANSYS aplinkoje, gautų skaitinio modeliavimo

rezultatų apdorojimą iš failų ir matematinių formulių taikymą jiems rankiniu būdu.

Norint sužinoti automatizuoto modeliavimo proceso naudą, buvo sukurti ir ištirti keli nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitiniai modeliai naudojant automatizuotą modeliavimo procesą ir be jo. Naudojant disertacijoje pasiūlytą automatizuotą modeliavimo procesą buvo sugaišta trečdaliu darbo laiko mažiau negu modeliuojant su standartinėmis ANSYS priemonėmis ir modeliavimo rezultatų apdorojimą atliekant rankiniu būdu.

2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. Atliekant skaitinį tyrimą, kai tiriamas modelis aproksimuojamas baigtinio dydžio elementais, yra efektyvu taikyti baigtinių elementų metodą. Taikant šį metodą nanometrines skyros mikrorobotų pjezomechaninių sistemų diskretizavimui, galima įvertinti mechaninių ir elektrinių laukų tarpusavio sąveiką.
2. Racionalių geometrinių parametru nustatymo uždavinį sudaro skaitinių sprendimo metodų apibrėžimas, dydžių, kurie gali būti uždavinio optimizavimo kriterijais, nustatymas bei apribojimų parinkimas.
3. Dominavimo koeficientų nustatymas leidžia parinkti reikiamą savąjį dažnį ir sumažinti optimizavimo ciklo kartojimų skaičių.
4. Elektrodo formų bei topologijų parinkimo pagrindinis tikslas yra gauti maksimalias virpesių amplitudes, susilpninti nepageidaujamas virpesių formas, o taip pat kuo labiau sumažinti mechaninių įtempimų koncentraciją pjezokeitiklyje.
5. Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklio analizėje esant harmoniniam žadinimui, naudojant gautus kontaktinių taškų poslinkius yra formuojamos jų judėjimo elipsinės trajektorijos, kurios padeda įvertinti ar parinkti kontaktiniai taškai juda reikiama kryptimi.
6. Darbe pasiūlytas skaitinio modeliavimo priemonių automatizavimas, kuris supaprastino skaitinio modeliavimo procesą, eliminuodamas standartinių priemonių naudojimą ANSYS aplinkoje, gautų skaitinio modeliavimo rezultatų apdorojimą rankiniu būdu, taip sutaupydama trečdalį darbo laiko.

3

Plokštuminių pjezokeitiklių skaitiniai modeliai

Šiame skyriuje aprašyti sukurti ir ištirti nanometrines skyros mikrorobotų stačiakampio ir žiedo formos pjezokeitiklių skaitiniai modeliai.

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių dinamikos uždaviniai buvo sprendžiami baigtinių elementų metodu. Skaičiavimai buvo atlikti naudojantis baigtinių elementų metodo programiniu paketu ANSYS 10 ir autoriaus sukurtomis programomis.

Atlikus nanometrines skyros mikrorobotų stačiakampio ir žiedo formos pjezokeitiklių skaitinį modeliavimą, pateikti diskretiniai modeliai, naudojamos elektrodų konfigūracijos. Rasti racionalūs geometriniai parametrai, išspręsti savųjų reikšmių uždaviniai, išnagrinėtos parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos. Savųjų formų atpažinimui buvo naudojami globaliniai dominavimo koeficientai.

Buvo atliktas žadinamo stačiakampio formos pjezokeitiklio skaitinis modeliavimas, kuris buvo naudojamas lazerio sklendės uždarymui esant harmoniniam žadinimui. Pateikti modeliuojamo žiedo formos pjezokeitiklio rezonansiniai dažniai, esant harmoniniam žadinimui, pasirinktame žadinimo dažnių spektre, kurie užtikrina žiedo sukimą, bei lenkimą. Taip pat ištirta žiedo tvirtinimo elementų įtaka žiedo sukimui, bei lenkimui.

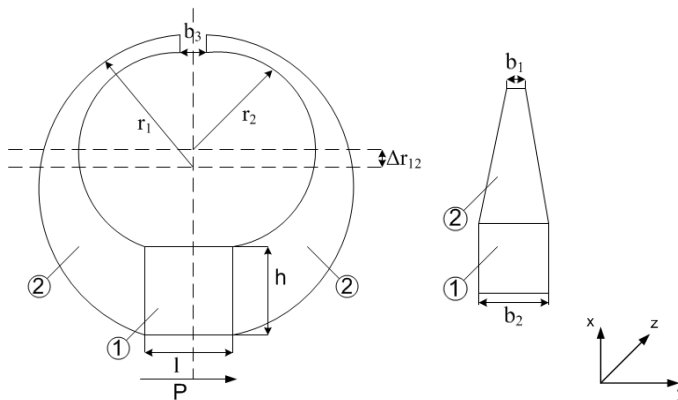
Tiriant trajektorijų charakteristikas buvo naudojami lyginamosios analizės metodai. Apibendrinant gautus rezultatus ir pateikiant praktines rekomendacijas buvo taikomi apibendrinimo metodai.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Grigoravičius 2010a; 2010b; 2013b; 2014).

3.1. Stačiakampio formos pjezokeitiklių modeliavimas

Šiame skyriuje buvo tiriamas stačiakampio formos pjezokeitiklis su dviem laisvės laipsniais, kuris buvo naudojamas lazerio sklendės uždarymui.

Lazerio sklendės, kurios modelį sudarė dvi sukljuotos stačiakampio formos pjezokeraminės plokštelės, kurių gale yra priklijuota kitos medžiagos masė, dinamikos tyrimus savo darbe nagrinėjo I. Tumasonienė (Tumasonienė 2009).



3.1 pav. Lazerio sklendės schema ir pradiniai jos geometriniai parametrai:
 $\{P\}$ – poliarizacijos vektoriaus kryptis, r_1 – išorinis spindulys (0,04 m), r_2 – vidinis spindulys (0,034 m), Δr_{12} – skirtumas tarp išorinio ir vidinio spindulių (0,003 m), b_1 – dalinio cilindro viršutinės sijos dalies plotis (0,003 m), b_2 – dalinio cilindro apatinės sijos dalies plotis (0,005 m), l – stačiakampio ilgis (0,008 m), h – stačiakampio aukštis (0,01 m), b_3 – sklendės plotis (0,001 m)

Fig. 3.1. The scheme of a laser shutter and its initial geometrical parameters:
 $\{P\}$ – the vector of polarisation, r_1 – outer radius (0.04 m), r_2 – inner radius (0.034 m), Δr_{12} – difference between r_1 and r_2 radii (0.003 m), b_1 – the width of partial cylinder upper beam (0.003 m), b_2 – the width of the partial cylinder lower beam (0.005 m), l – the length of the rectangular (0.008 m), h – the height of the rectangular (0.01 m), b_3 – the width of the valve (0.001 m)

Tyrimo uždavinyje lazerio sklendės skaitinį modelį sudarė stačiakampio formos pjezokeraminė plokštelė (pažymėta numeriu 1; 3.1 pav.), prie kurios šonų buvo priklijuoti du daliniai cilindrai (pažymėti numeriu 2; 3.1 pav.).

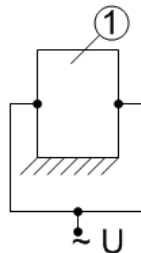
Skaitinio modeliavimo metu buvo rasti racionalūs geometriniai parametrai, išspręsti savųjų reikšmių uždaviniai. Išnagrinėti parinktų lazerio sklendės sijų galuose esančių kontaktinių taškų, kurie užtikrino užsidariusios lazerio sklendės sandarumą, judėjimo trajektorijos.

Modeliuojant lazerio sklendę, pjezokeraminei plokštei, pažymėtai 1 numeriu, buvo nustatytos CTS-23 (<http://www.ferroperm-piezo.com>) pjezokeraminės medžiagos savybės.

Tuo tarpu priklijuotiems daliniams cilindrams buvo nustatytos titano medžiagos savybės. Poliarizacijos vektorius buvo nukreiptas išilgai plokštelės ilgio. CTS-23 ir titano medžiagų detalios savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant lazerio sklendę, pateiktos 1 lentelėje A prieduose.

Lazerio sklendės veikimui užtikrinti buvo naudojama elektrodų konfigūracija pateikta 3.2 paveiksle.

Naudojant šią schemą apatinės pjezokeraminės plokštelės (pažymėta numeriu 1; 3.1 pav.) dalies elektrodas buvo įžemintas. Tuo tarpu pjezokeraminės plokštelės šoniniai paviršiai buvo padengti elektrodais, prie kurių prijungta 30 V įtampa.



3.2 pav. Elektrodų išdėstymo schema

Fig. 3.2. The scheme of the electrodes placement

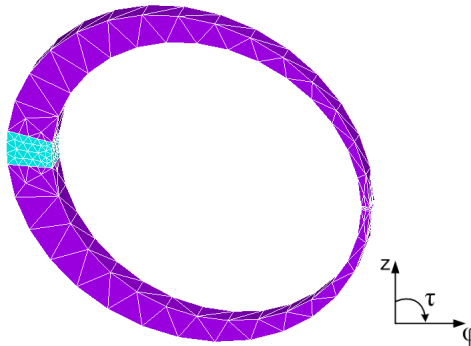
Pradiniame tyrimo etape buvo rasti lazerio sklendės racionalūs geometriniai parametrai. Parenkant lazerio sklendės geometrinius parametrus buvo atsižvelgiama, jog žadinama lazerio sklendė užsidarinėtų kuo sandariau (b_3 artėtų į 0; 3.1 pav.) bei sklendės užsidarymo intensyvumas būtų racionalus technologiniu požiūriu.

Kiekvienam nagrinėjamam modeliui buvo sprendžiamas savųjų reikšmių uždavinys, gauti savieji sistemos dažniai. Savųjų formų atpažinimui buvo suskaičiuoti globaliniai dominavimo koeficientai. Žemiau pateikiama detalesnė analizė.

3.1.1. Stačiakampio formos pjezokeitiklių savųjų reikšmių uždavinys

Sudarant lazerio sklendės baigtinių elementų modelį (BEM), buvo pasirinkti tokie baigtinių elementų tipai: SOLID 98, SOLID 5, SOLID 62 ir SOLID 95 (ANSYS programos žymėjimas). SOLID 98, SOLID 5, SOLID 62 elementai buvo naudojami pjezokeraminei plokštei modeliuoti, o SOLID 95 buvo naudojamas daliniams cilindrams diskretizuoti. Detalesnės šių baigtinių elementų tipų charakteristikos, dėl kurių buvo pasirinkti būtent šitie tipai, yra pateiktos A prieduose. Nagrinėjamos lazerio sklendės pjezokeraminės plokštelės apačia buvo standžiai įtvirtinta.

Lazerio sklendės, kurios modeliavimui buvo naudojami pradiniai geometriniai parametrai, baigtinių elementų modelis pateiktas 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Lazerio sklendės BEM
Fig. 3.3. FEM of laser shutter

Tyrimo modalinėje dalyje, nustatant racionalius lazerio sklendės geometrinius parametrus, detalai buvo išnagrinėti trys modeliai.

Šiuose modeliuose buvo keičiamas dalinių cilindrų viršutinės sijos dalies plotis b_1 režyje nuo 0,003 m iki 0,005 m, parenkant intervalą kas 0,001 m.

Taip pat buvo keičiamas dalinių cilindrų vidinis spindulys r_2 režyje nuo 0,03 m iki 0,034 m, parenkant intervalą kas 0,002 m.

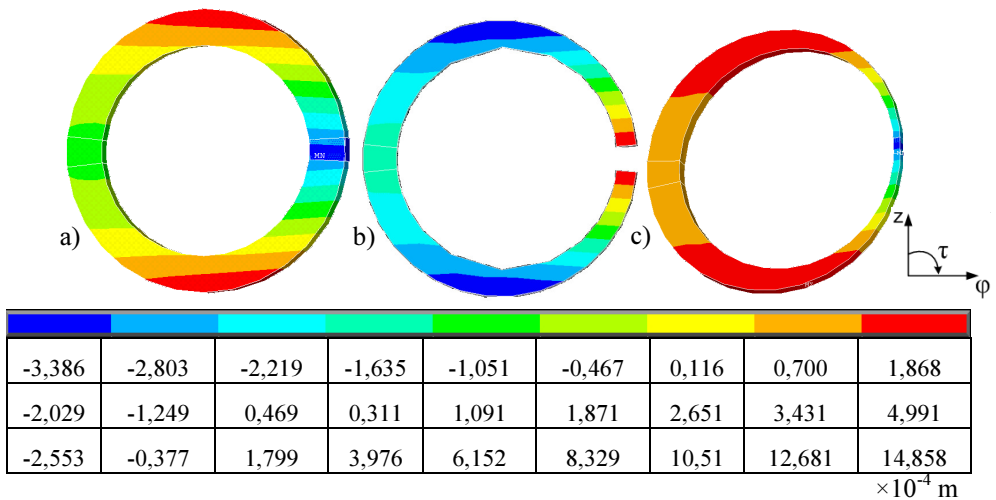
Spindulio r_2 keitimas buvo reikalingas skirtumo tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindrų spindulių keitimui, išlaikant pastovų pjezokeraminės plokštelės aukštį h .

Skirtumas tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindrų spindulių keitėsi režyje nuo 0,003 m iki 0,006 m, parenkant intervalą kas 0,002 m. Geometrinių parametų išdėstymas pateiktas 3.1 paveiksle.

Lazerio sklendės savųjų reikšmių uždaviniai buvo sprendžiami naudojant Block Lanczos sprendiklį. Kiekvienam lazerio sklendės baigtinių elementų modeliui buvo suskaičiuojama po 40 savųjų dažnių ir formų.

Sprendžiant lazerio sklendės savųjų reikšmių uždavinius medžiagos slopinimas nebuvo vertinamas modeliuose. CTS-23 ir titano medžiagų detalios savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant lazerio sklendę, pateiktos 1 lentelėje A prieduose.

Elektrodų konfigūracija, pagal kurią buvo žadinamas lazerio sklendės stačiakampio formos pjezokeitiklis, pateikta 3.2 paveiksle.



3.4 pav. Lazerio sklendės savosios formos esant skirtingiems geometriniais parametrams: a) kai savasis dažnis 823 Hz; $r_2 = 0,03$ m; $\Delta r_{12} = 0,006$ m; $b_1 = 0,005$ m;

b) kai savasis dažnis 873 Hz; $r_2 = 0,032$ m; $\Delta r_{12} = 0,004$ m; $b_1 = 0,004$ m;

c) kai savasis dažnis 1153 Hz; $r_2 = 0,034$ m; $\Delta r_{12} = 0,003$ m; $b_1 = 0,003$ m

Fig. 3.4. Laser shutter eigenforms given with different geometrical parameters:

a) when eigenfrequency 823 Hz; $r_2 = 0.03$ m; $\Delta r_{12} = 0.006$ m; $b_1 = 0.005$ m;

b) when eigenfrequency 873 Hz; $r_2 = 0.032$ m; $\Delta r_{12} = 0.004$ m; $b_1 = 0.004$ m;

c) when eigenfrequency 1153 Hz; $r_2 = 0.034$ m; $\Delta r_{12} = 0.003$ m; $b_1 = 0.003$ m

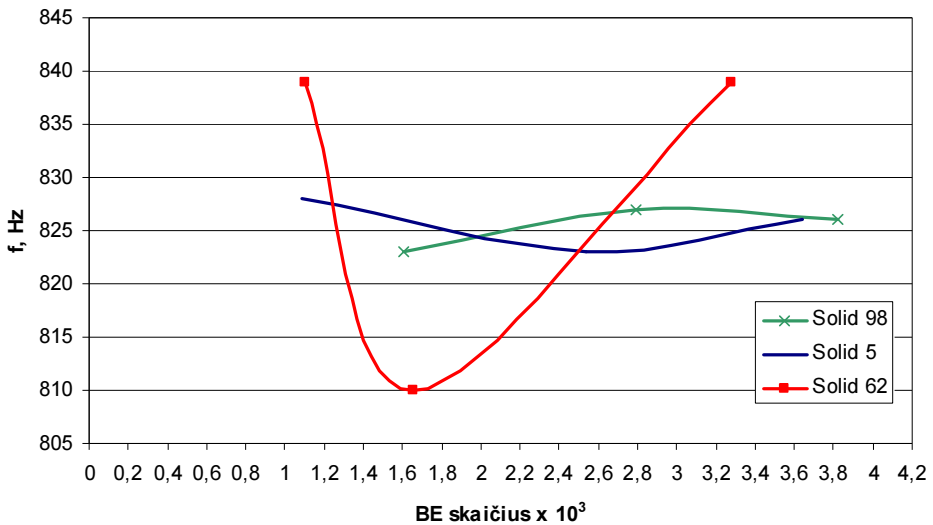
Šiame tyrimų etape rezultatai pateikiami cilindrinėje koordinačių sistemoje, nes taip jie tiksliau nusako virpesių charakterį. Normuotos pagal masių matricą virpesių amplitudės iš stačiakampės koordinačių sistemos pervedamos į cilindrinę, paketo ANSYS pagalba. Tokia transformacija yra nesunkiai atliekama, kadangi skaičiavimų rezultatai saugomi lokalinėje elemento koordinačių sistemoje.

Išsprendus savųjų reikšmių uždavinius, gautos savosios lazerio sklendės formos pateikiamos 3.4 paveiksle, kai buvo keičiami: dalinių cilindrų viršutinės

sijos dalies plotis b_l (3.1 pav.) ir dalinių cilindrų vidinis spindulys r_2 (3.1 pav.), tam kad įtakoti skirtumą tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindrų spindulių, išlaikant pastovų pjezokeraminės plokštelės aukštį h (3.1 pav.).

Norint ištirti skaitinių sprendinių tikslumą lazerio sklendė buvo modeliuojama prie skirtingų baigtinių elementų tipų bei tinklų.

Žemiau paveiksle pateiktos pasirinkto lazerio sklendės modelio savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų: SOLID 98, SOLID 5, SOLID 62, kurios gautos prie skirtingo baigtinių elementų skaičiaus (keičiant tinklo regionų sutankinimą).



3.5 pav. Lazerio sklendės savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir tinklų

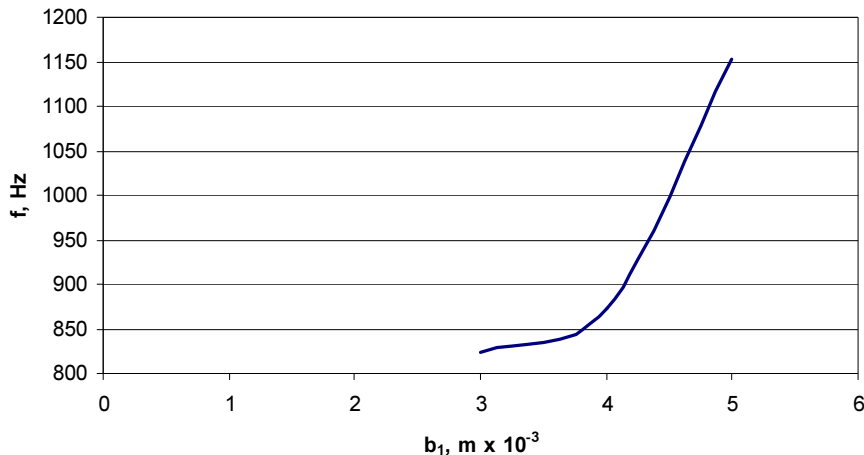
Fig. 3.5. Dependencies of eigenfrequencies of laser shutter from types and meshes of finite elements

Atliekant lazerio sklendės skaitinį modeliavimą, parinkinėjant skirtingus geometrinių matmenų santykius, buvo pastebėta, jog mažinant atstumą tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindrų spindulių ir tuo pačiu mažinant dalinių cilindrų viršutinės sijos dalies plotį, lazerio sklendės savasis dažnis didėjo.

Esant siauresnėms lazerio sklendės sijos prie mažų savųjų dažnių gaunamos kitos savosios formos.

Dėl šios priklausomybės galima daryti prielaidą, jog kuo siauresnės lazerio sklendės sijos, tuo intensyviau reikia žadinti, kad gauti sklendės uždarymą.

Žemiau 3.6 paveiksle pateikiama diagrama vaizduoja lazerio sklendės savųjų dažnių priklausomybes nuo atstumo Δr_{12} (3.1 pav.) tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindrų spindulių ir dalinių cilindrų viršutinės sijos dalies pločio b_l (3.1 pav.).



3.6 pav. Lazerio sklendės geometrinių parametru įtaka saviesiems dažniams
Fig. 3.6. The influence of geometrical parameters of laser shutter on eigenfrequencies

Atliekant lazerio sklendės modalinę analizę pastebėta, jog keičiant geometrinius parametrus, lazerio sklendės savosios formos išgaunamos vis prie kitų dažnių, t. y. pasikeičia savųjų formų vieta jų eilėje.

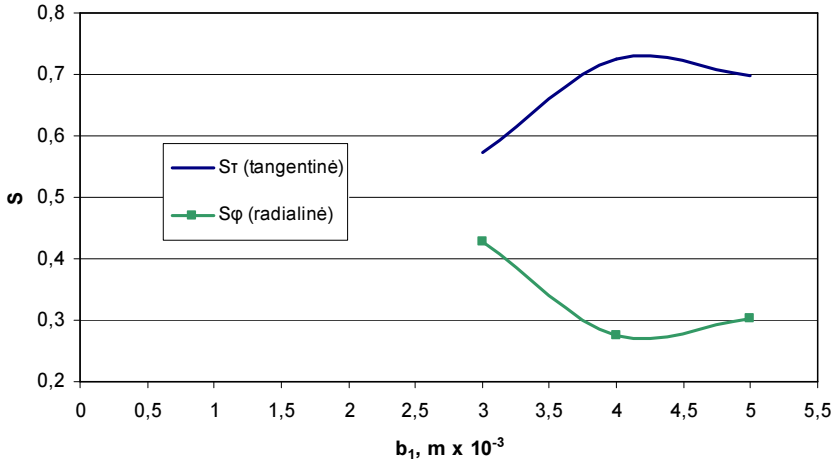
Pjezokeitiklių savosios formos keičiasi dėl to, kad pagal savųjų reikšmių uždavinio algoritmą sistemų savieji dažniai išdėstomi didėjimo tvarka.

Tokia dažnių rūšiavimo taisyklė yra nepalanki, kai norima automatizuoti skaitinius tyrimus (Барыскас 1984). Situacija komplikuojasi ir todėl, kad skirtingų virpesių dažnių sritys persidengia.

Dalinai problema buvo sprendžiama skaičiuojant dominavimo koeficientus, naudojant (2.31) ir (2.32) formules.

Gautų dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo atstumo Δr_{12} (3.1 pav.) tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindrų spindulių ir dalinių cilindrų viršutinės sijos dalies pločio b_l (3.1 pav.) pateikiamos 3.7 paveiksle.

Gautos dominavimo koeficientų reikšmės išilgine kryptimi buvo pakankamai mažos, todėl jos nėra įtrauktos į paveikslą.



3.7 pav. Lazerio sklendės geometrinų parametrų įtaka dominavimo koeficientams
Fig. 3.7. The influence of geometrical parameters of laser shutter on domination coefficients

Kaip matyti iš 3.6 paveiksle pateiktų rezultatų, didžiausios dominavimo koeficientų reikšmės gautos tangentine kryptimi, o tai reiškia, kad dominavo lazerio sklendės sijų lenkiamieji judesiai, kurie reikalingi lazerio sklendės uždarymui.

Atsižvelgiant į dominavimo koeficientų reikšmes buvo pasirinkti pirmas tiriamas modelis, kai atstumas Δr_{12} (3.1 pav.) tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindų spindulių yra 0,006 m, o dalinių cilindų viršutinės sijos dalies plotis b_1 (3.1 pav.) yra 0,005 m, ir antras tiriamasis modelis, kai atstumas Δr_{12} (3.1 pav.) tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindų spindulių yra 0,004 m, o dalinių cilindų viršutinės sijos dalies plotis b_1 (3.1 pav.) yra 0,004 m.

Antras modelis (3.4 pav., b) turėjo didesnę dominavimo koeficientų reikšmę tangentine kryptimi, bet jo sijų judėjimas žadinimo metu neuždarė sklendės, o atvirkščiai – ją labiau atidarė.

Toks lazerio sklendės veikimas neatitiko techninių šios sistemos reikalavimų ir galimai pažeistų konstrukcijas, todėl kaip lazerio sklendės uždarymui tinkantis modelis pasirinktas pirmasis (3.4 pav., a).

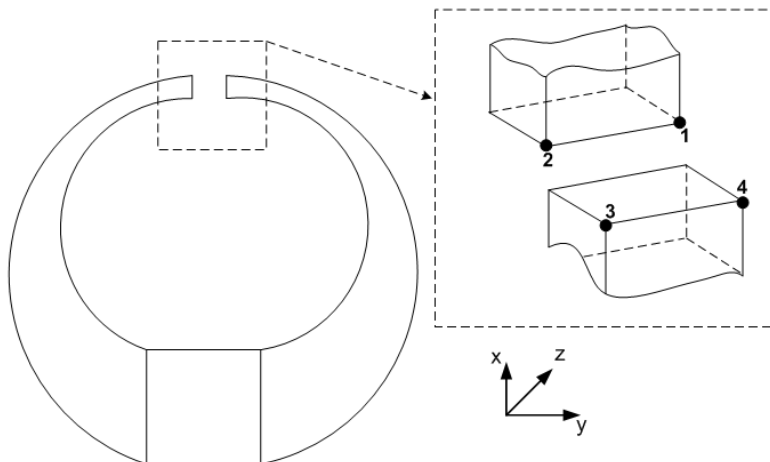
Taigi, išanalizavus geometrinių parametrų įtaką dominavimo koeficientams, bei saviesiems dažniams, remiantis gautais rezultatais, buvo pasirinktas lazerio sklendės modelis, kurio atstumas Δr_{12} (3.1 pav.) tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindų spindulių yra 0,006 m, o dalinių cilindų viršutinės sijos dalies plotis b_1 (3.1 pav.) yra 0,005 m, tolimesniems tyrimams atlikti.

3.1.2. Stačiakampio formos pjezokeitiklių analizė esant harmoniniam žadinimui

Kitas žingsnis lazerio sklendės skaitinio modeliavimo procese buvo rasti stačiakampio formos pjezokeitiklio veikimo rezonansinius dažnius pasirinktame žadinimo dažnių spektre, bei nustatyti parinktų kontaktinių taškų, kurie užtikrino lazerio sklendės uždarymą, elipsines judesio trajektorijas.

Šiame tyrimų etape buvo nagrinėjamos žadinamos, pagal pateiktą 3.2 paveiksle elektrodų konfigūraciją, lazerio sklendės sijų galuose parinktų kontaktinių taškų elipsinės judėjimo trajektorijos pagal x, z ir y, z ašis, įvertinant jų didžiosios ir mažosios ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus, buvo nustatytos didžiausios santykinės reikšmės. Šioje tyrimo dalyje medžiagos slopinimas buvo vertinamas modeliuose. Medžiagų CTS-23 ir titano charakteristikos, naudojamos modeliuojant lazerio sklendes, pateiktos 1 lentelėje A prieduose. Šiame tyrimų etape rezultatai pateikiami dekartos plokštumos koordinačių sistemoje. Analizei buvo pasirinktas 700–950 Hz žadinimo įtampos dažnio kitimo intervalas su 10 Hz dažnių kitimo žingsniu.

Detalūs tyrimai buvo atliekami keturiems taškams, esantiems lazerio sklendės sijų galuose. Parinktų taškų išdėstymas pateikiamas 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Lazerio sklendės galuose parinkti taškai detalesniam poslinkių ir jų krypčių tyrimui

Fig. 3.8. The selected contact points at the ends of the laser shutter beams for detailed displacement and their movement investigation

Lazerio sklendės elipsinių kontaktinių taškų judesio trajektorijų nustatymui buvo naudojama (2.33) formulė.

Įvertinus parinktų kontaktinių taškų (3.8 pav.) santykius tarp didžiosios ir mažosios elipsės ašies, buvo nustatyta, jog amplitudžių pikai buvo pasiekti rezonansiniame dažnyje.

Taip pat buvo pastebėta, jog skirtingų taškų sukimosi kampas skirtingose vietose žymiai skiriasi rezonansiniame dažnyje, o tuo tarpu tolstant nuo rezonanso, visų pasirinktų taškų sukimosi kampas artėjo prie konkrečios reikšmės.

Pagal tai buvo padarytos prielaidos, jog parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos artėjo prie rezonanso kreivės ir buvo pasiektas sklendės uždarymas.

Nagrinėjant lazerio sklendės sijų galuose parinktų taškų (3.8 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis, buvo pastebėta, jog prie skirtingų dažnių judėjimo trajektorijų, kryptys skiriasi.

Todėl buvo padaryta dar viena prielaida, jog savieji dažniai gerai parinkti sklendės uždarymui gauti.

Taip pat buvo pastebėta, jog kontaktinių taškų, kurių elipsės turėjo didesnę didžiąją ašį ir apėmė didesnę plotą, judėjimas buvo aktyvesnis, bei amplitudės pikas, atitinkamai, buvo galingesnis.

Pagal elipsių sukimosi kampus buvo nustatyta, kuria kryptimi, pagal x , z ir y , z ašių kordinačių sistemą, judės kontaktiniai taškai ir ar jie susijungdami uždarys sklendę.

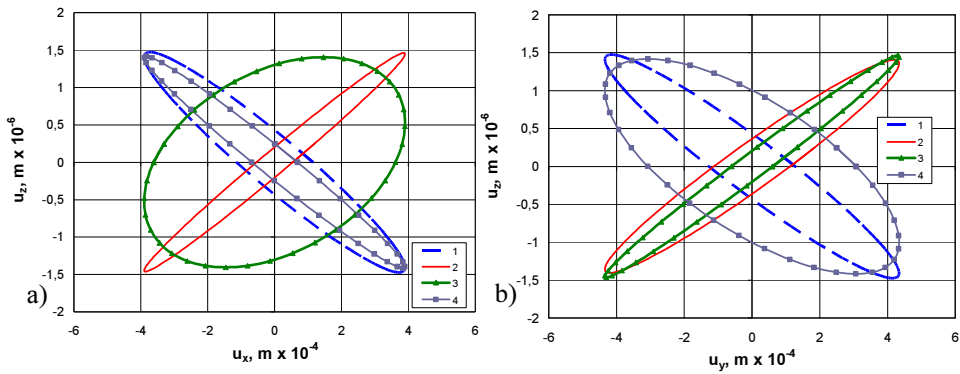
Išnagrinėjus lazerio sklendės sijų galuose parinktų kontaktinių taškų (3.8 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis (3.9 pav.), įvertinus jų didžiosios ir mažosios ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus prie skirtingų dažnių, buvo pasirinktas modelis tinkantis lazerio sklendės uždarymui, kurio atstumas Δr_{12} (3.1 pav.) tarp vidinių ir išorinių dalinių cilindrų spindulių yra 0,006 m, o dalinių cilindrų viršutinės sijos dalies plotis b_1 (3.1 pav.) yra 0,005 m ir yra žadinamas prie 823 Hz dažnio.

Žemiau pateikti paveikslai vaizduoja lazerio sklendės sijų galuose parinktų kontaktinių taškų (3.8 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis. Žadinimui naudojama elektrodų schema, pateikta 3.2 paveiksle.

Analizuojant elipsių trajektorijas pagal x ašį 1-ajame ir 3-ajame lazerio sklendės sijų galuose parinktuose taškuose (3.8 pav.) buvo gautos didžiausios santykinės reikšmės.

Atitinkamai analizuojant elipsių trajektorijas pagal y ašį, didžiausios santykinės reikšmės buvo gautos 1-ajame ir 4-ajame lazerio sklendės sijų galuose parinktuose taškuose (3.8 pav.).

Remiantis gautais rezultatais buvo nustatyta, jog užsidariusios lazerio sklendės sandarumą labiausiai įtakoja 3.7 paveiksle 1-uju ir 4-uju numeriais pažymėti lazerio sklendės sijų galuose parinkti taškai.



3.9 pav. Lazero sklendės sijų galuose parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal x, z (a) ir y, z (b) ašis prie 823 Hz savojo dažnio

Fig. 3.9. Movement trajectories of the selected points at the ends of the beams on x, z (a) and y, z (b) axes at 823 Hz eigenfrequency

3.2. Žiedo formos pjezokeitiklių modeliavimas

Šiame skyriuje pirminį pjezokeitiklio skaitinį modelį sudarė pjezokeraminis žiedas su dviem laisvės laipsniais, kurio schema pateikta 3.10 paveiksle.

Tokio tipo pjezokeitikliai dažniausiai naudojami kaip atskiros sistemos. Šių sistemų pritaikomumas yra gan platus, jos naudojamos pozicionavimo sistemose, robotų judančiose dalyse.

Modeliuojamas pjezokeraminis žiedas buvo nagrinėjamas atsižvelgiant į tai, jog jis bus taikomas kaip sudėtingos sistemos sudėtinė dalis.

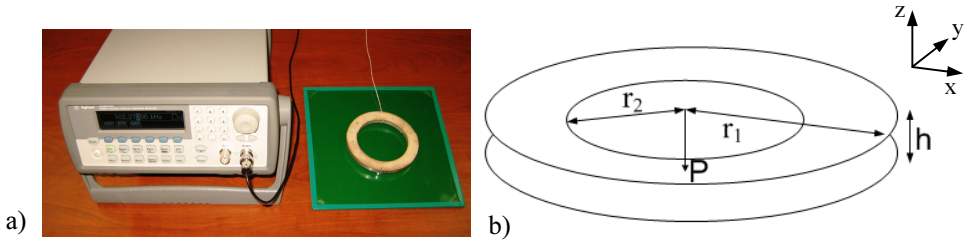
Sudėtingose kompleksinėse sistemose pagal poreikį papildant konstrukciją pjezokeraminiais komponentais, galima padidinti sistemos laisvės laipsnių skaičių, bei tuo pačiu sistemos pozicionavimo galimybes.

Žadinamame pjezokeraminiame žiede buvo nagrinėjami sukimo, bei lankstymo judesiai, kurie įgalina sistemą pozicionuoti plokštumoje norima kryptimi.

Norint apriboti sukimo ir lankstymo judesius, sistema buvo papildyta tvirtinimo elementais, esančiais žiedo viduje.

Tyrimo metu skaitinio modeliavimo rezultatai leido pateikti svarbią informaciją apie pjezokeitiklio savuosius dažnius.

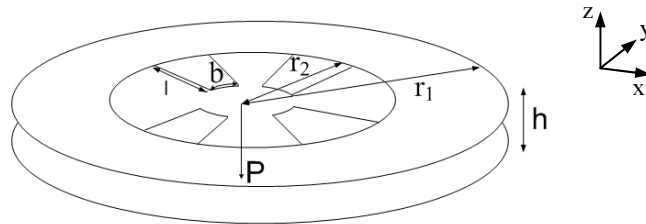
Buvo rasti racionalūs žiedo geometriniai parametrai. Išnagrinėtos parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos bei skirtingų matmenų tvirtinimo elementų įtaka žiedo judėjimui.



3.10 pav. Modelio schemas: a) Eksperimentinio modelio schema (Bansevicius 2007); Žiedo schema ir pradiniai geometriniai parametrai: $\{P\}$ – poliarizacijos vektoriaus kryptis, h – žiedo storis (0,002 m), r_1 – žiedo išorinis spindulys (0,015 m), r_2 – žiedo vidinis spindulys (0,005 m)

Fig. 3.10. Model schemes: a) the scheme of the experimental model; the scheme of the ring and initial geometrical parameters: $\{P\}$ – the vector of polarisation, h – the width of the ring (0.002 m), r_1 – outer radius (0.015 m), r_2 – inner radius (0.005 m)

Pjezokeraminio žiedo modelio, papildyto tvirtinimo elementais, schema pateikta 3.11 paveiksle.

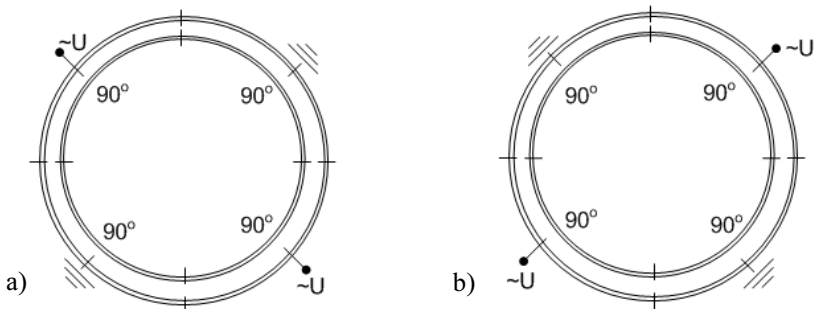


3.11 pav. Žiedo su tvirtinimo elementais schema ir pradiniai geometriniai parametrai: $\{P\}$ – poliarizacijos vektoriaus kryptis, h – žiedo storis (0,002 m), r_1 – žiedo išorinis spindulys (0,015 m), r_2 – žiedo vidinis spindulys (0,005 m), l – tvirtinimo kojelės ilgis (0,0039 m), b – tvirtinimo kojelės plotis (0,005236 m)

Fig. 3.11. The scheme of ring with fortifying elements and initial geometrical parameters: $\{P\}$ – the vector of polarisation, h – the width of the ring (0.002 m), r_1 – outer radius (0.015 m), r_2 – inner radius (0.005 m), l – fortifying stem length (0.0039 m), b – fortifying stem width (0.005236 m)

Modeliuojant pjezokeraminį žiedą ir jo tvirtinimo elementus jiems buvo nustatytos PZT-8 (<http://www.ferroperm-piezo.com>) pjezokeraminės medžiagos savybės, poliarizacijos vektorius buvo nukreiptas išilgai žiedo storio. Detalios PZT-8 medžiagos savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant pjezokeraminį žiedą, pateiktos 1 lentelėje A prieduose.

Elektrodų konfigūracija, naudojama tyrime žiedo sukimui bei lankstymui žadinti, pateikta 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Elektrodo išdėstymo schema: a) Viršutinės žiedo dalies sekcijų išsidėstymas; b) Apatinės žiedo dalies sekcijų išsidėstymas

Fig. 3.12. The scheme of electrodes placement: a) The deployment of upper sections of the ring; b) The deployment of lower sections of the ring

Žadinimui užtikrinti viršutinė ir apatinė žiedo dalys buvo padalintos į keturias lygias sekcijas. Elektrodai buvo sujungti tokiu principu: jei prie viršutinės žiedo dalies sekcijos elektrodo prijungta įtampa, tai lygiagrečios apatinės žiedo dalies sekcijos elektrodas išemintas, ir atvirkščiai, jei viršutinės žiedo dalies sekcijos elektrodas išemintas, tai prie apatinės žiedo dalies sekcijos elektrodo, prijungta įtampa.

Nustatant pjezokeraminio žiedo skaitinių modelių racionalius geometrinius parametrus buvo atsižvelgiama, jog žadinamas žiedas neprarastų sukimo bei lankstymo judėjimo, kuris įgalina žiedą pozicionuoti plokštumoje. Norint užtikrinti žiedo sukimo, bei lenkimo efektyvumą, bei greitaveiką buvo stengiamasi gauti kuo didesnius savuosius dažnius, prie kurių sukimas bei lankstymas būtų aktyvesni. Tyrimo metu taip pat buvo siekiama, jog gauti žiedo formos modeliai atitiktų keliamus techninius sistemos reikalavimus ir būtų racionalūs technologiniu požiūriu.

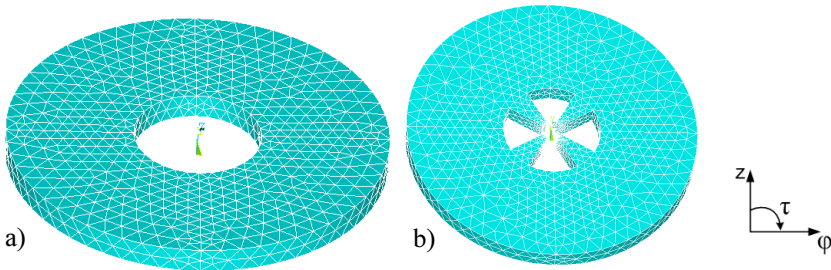
Kiekvienam nagrinėjamam modeliui buvo sprendžiamas savųjų reikšmių uždavinys, gauti savieji sistemos dažniai. Savųjų formų atpažinimui buvo suskaičiuoti globaliniai dominavimo koeficientai. Žemiau pateikiama detalesnė analizė.

3.2.1. Žiedo formos pjezokeitiklių savųjų reikšmių uždavinys

Sudarant nanometrines skyros mikrorobotų žiedo formos pjezokeitiklių baigtinių elementų modelį (BEM), buvo pasirinkti: SOLID 98, SOLID 5, SOLID 186, SOLID 62 (ANSYS programos žymėjimas) baigtinių elementų tipai. SOLID 98, SOLID 5, SOLID 186, SOLID 62 elementai buvo naudojami pjezokeraminiam

žiedui modeliuoti. Detalesnės šių baigtinių elementų tipų charakteristikos, dėl kurių buvo pasirinkti būtent šitie tipai, yra pateiktos A prieduose.

Pjezokeraminių žiedų be tvirtinimo elementų ir su tvirtinimo elementais, kurių modeliavimui buvo naudojami pradiniai geometriniai parametrai, baigtinių elementų modeliai pateikti 3.13 paveiksle.



3.13 pav. Pjezokeraminių žiedų BEM: a) Pjezokeraminis žiedas be tvirtinimo elementų; b) Pjezokeraminis žiedas su tvirtinimo elementais

Fig. 3.13. FEM of piezoceramic rings: a) Piezoceramic ring without fortifying elements; b) Piezoceramic ring with fortifying elements

Tyrimo modalinėje dalyje, nustatant pjezokeraminio žiedo ir jo tvirtinimo elementų racionalius geometrinius parametrus, iš viso detalai buvo išnagrinėta dvylika baigtinių elementų modelių.

Nustatant žiedo vidinio spindulio r_2 (3.10 pav.) racionalius geometrinius matmenis, buvo išnagrinėti penki skaitiniai modeliai, kai vidinis spindulys buvo keičiamas intervale nuo 0,005 m iki 0,01 m, kas 0,00125 m. Taip pat tyrimo eigoje buvo parakinėjamas žiedo išorinis spindulys r_1 (3.10 pav.). Buvo išnagrinėti trys skaitiniai modeliai, kai išorinis spindulys buvo keičiamas intervale nuo 0,01 m iki 0,0175 m, kas 0,0025 m.

Vėliau papildžius skaitinį modelį tvirtinimo elementais, buvo nustatytas racionalus žiedo tvirtinimo kojelės plotis b (3.11 pav.). Šiame etape buvo išnagrinėti keturi modeliai, kai plotis buvo keičiamas intervale nuo 0,0017453 m iki 0,0069813 m.

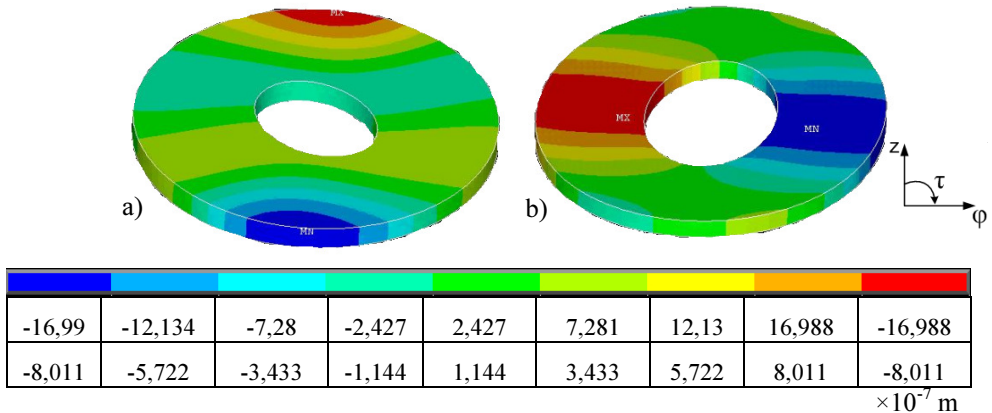
Pjezokeraminių žiedų savųjų reikšmių uždaviniai buvo sprendžiami naudojant Block Lanczos sprendiklį. Kiekvienam pjezokeraminio žiedo baigtinių elementų modeliui buvo suskaičiuota po 40 savųjų dažnių ir formų.

Sprendžiant pjezokeraminių žiedų savųjų reikšmių uždavinius, medžiagos slopinimas nebuvo vertinamas modeliuose. Detalios PZT-8 medžiagos savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant pjezokeraminius žiedus, pateiktos 1 lentelėje A prieduose. Žiedas buvo žadinamas pagal elektrodų konfigūraciją, pateiktą 3.12 paveiksle.

Šiame tyrimų etape rezultatai pateikiami cilindrinėje koordinačių sistemoje, nes taip jie tiksliau nusako virpesių charakterį. Virpesių amplitudės, normuotos pagal masių matricą, iš stačiakampės koordinačių sistemos pervedamos į cilindrinę, paketo ANSYS pagalba. Tokia transformacija yra nesunkiai atliekama, kadangi skaičiavimų rezultatai saugomi lokalinėje elemento koordinačių sistemoje.

Išsprendus savųjų reikšmių uždavinius, atrinktos savosios formos tolimesniems tyrimams pateikiamos 3.14 paveiksle, kai pjezokeraminiame žiede išgautas sukimas ir lenkimas, kai buvo keičiamas vidinis spindulys r_2 (3.10 pav.) intervale nuo 0,005 m iki 0,01 m.

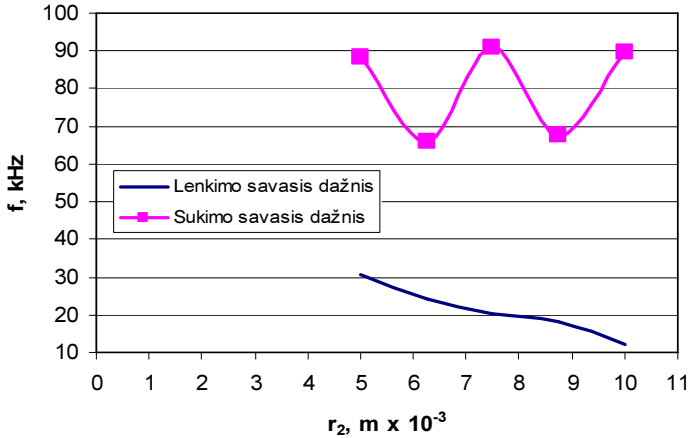
Atliekant pjezokeraminio žiedo skaitinį modeliavimą, parinkinėjant skirtingus geometrinių matmenų santykius, buvo pastebėta, jog mažinant žiedo vidinį spindulį r_2 (3.10 pav.), pjezokeraminio žiedo, kai gaunamas lenkimas, savasis dažnis didėjo. Tuo tarpu mažinant žiedo vidinį spindulį (3.10 pav.) pjezokeraminio žiedo, kai gaunamas sukimas, savasis dažnis kito tarp 66 kHz ir 90 kHz. Dažnio svyravimams įtakos turėjo proporcingus išorinio spindulio keitimas nuo 0,015 m iki 0,02 m, tam kad modelis išliktų racionalus technologiniu požiūriu.



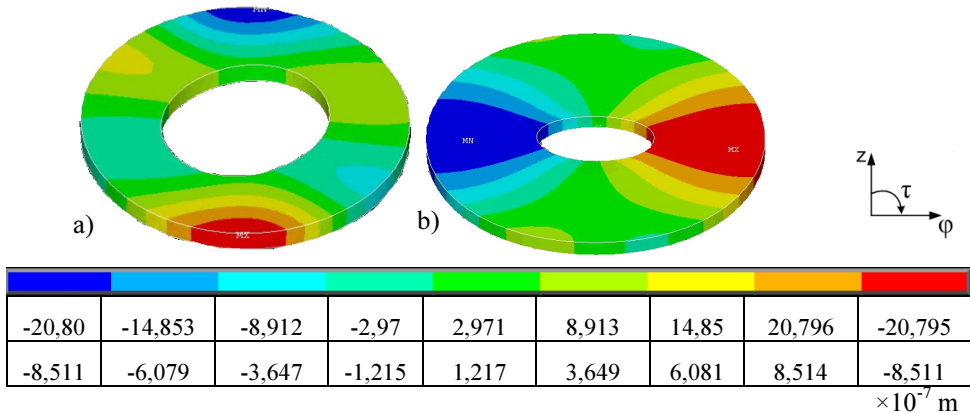
3.14 pav. Savosios pjezokeraminių žiedų formos, kai buvo pasiektas sukimas ir lenkimas ir buvo keičiamas vidinis spindulys: a) kai savasis dažnis 88,5 kHz, buvo pasiektas sukimas ($r_2 = 0,005 \text{ m}$); b) kai savasis dažnis 18 kHz, buvo pasiektas lenkimas ($r_2 = 0,00875 \text{ m}$)

Fig. 3.14. Eigenforms of piezoceramic rings, when rotation and bending were achieved and the inner radius was changed: a) when eigenfrequency 88.5 kHz, the rotation was achieved ($r_2 = 0.005 \text{ m}$); b) when eigenfrequency 18 kHz, the bending was achieved ($r_2 = 0.00875 \text{ m}$)

Žemiau 3.15 paveiksle pateikiama diagrama vaizduoja pjezokeraminio žiedo savųjų dažnių priklausomybes nuo žiedo vidinio spindulio r_2 (3.10 pav.), kai žiedo aukštis nebuvo keičiamas.



3.15 pav. Žiedo savųjų dažnių priklausomybės nuo žiedo vidinio spindulio
Fig. 3.15. Dependencies of ring eigenforms from inner radius of the ring



3.16 pav. Savosios pjezokeraminių žiedų formos, kai buvo pasiektas sukimas ir lenkimas ir buvo keičiamas išorinis spindulys:

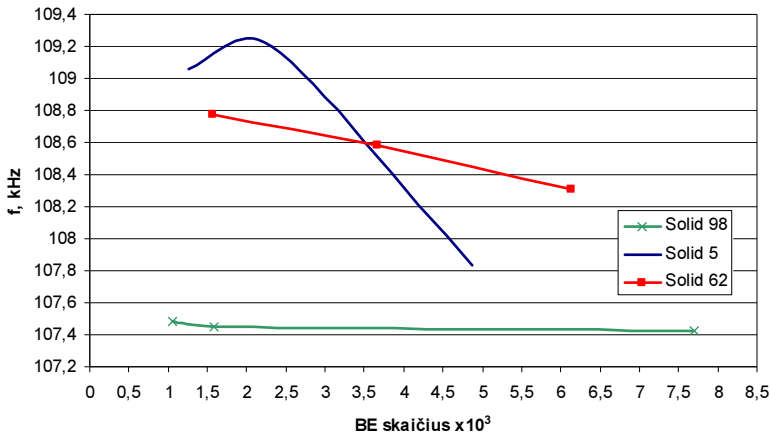
- a) kai savasis dažnis 107,4 kHz, buvo pasiektas sukimas ($r_l = 0,0125 \text{ m}$);
- b) kai savasis dažnis 29,2 kHz, buvo pasiektas lenkimas ($r_l = 0,0175 \text{ m}$)

Fig. 3.16. Eigenforms of piezoceramic rings, when rotation and bending were achieved and the outer radius was changed:

- a) when eigenfrequency 107.4 kHz, the rotation was achieved ($r_l = 0.0125 \text{ m}$);
- b) when eigenfrequency 29.2 kHz, the bending was achieved ($r_l = 0.0175 \text{ m}$)

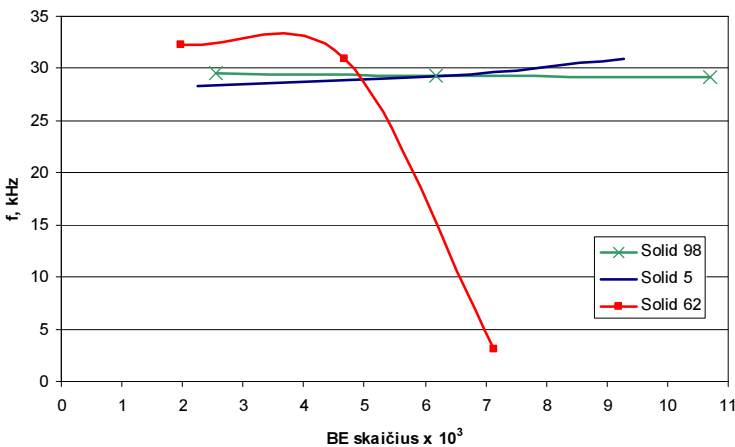
Kai buvo keičiamas išorinis spindulys r_1 (3.10 pav.) intervale nuo 0,01 m iki 0,0175 m, atrinktos savosios formos tolimesniems tyrimams pateikiamos 3.16 paveiksle, kai pjezokeraminiame žiede išgautas sukimas ir lenkimas.

Žiedo skaitinių sprendinių tikslumas, buvo ištirtas prie skirtingų baigtinių elementų tipų bei tinklų.



3.17 pav. Žiedo, kai buvo gautas sukimas, savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir tinklų

Fig. 3.17. Dependencies of eigenfrequencies of the ring, when the rotation was obtained, from types and meshes of finite elements



3.18 pav. Žiedo, kai buvo gautas lenkimas, savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir tinklų

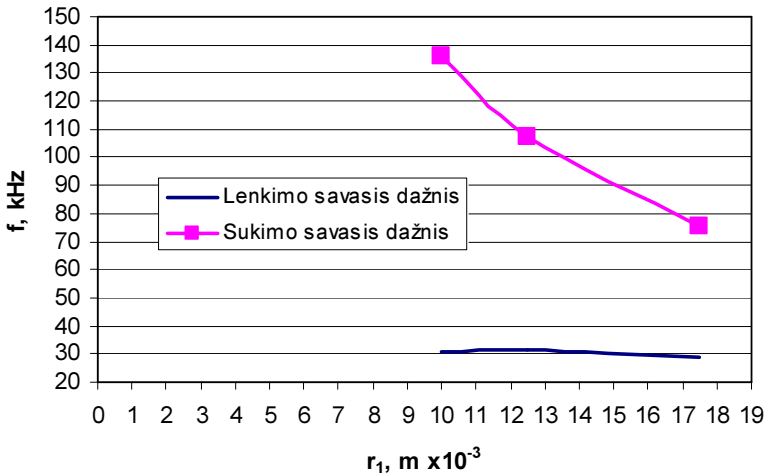
Fig. 3.18. Dependencies of eigenfrequencies of the ring, when the bending was obtained, from types and meshes of finite elements

3.17 ir 3.18 paveiksluose pateiktos pasirinkto žiedo modelio savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų: SOLID 98, SOLID 5, SOLID 62, kurios gautos prie skirtingo baigtinių elementų skaičiaus (keičiant tinklo regionų sutankinimą), kai buvo keičiamas išorinis spindulys r_1 (3.10 pav.) ir buvo gautas žiedo sukimas (3.17 pav.) ir lenkimas (3.18 pav.)

Parinkinėjant skirtingus išorinio žiedo spindulio r_1 (3.10 pav.) matmenis, buvo pastebėta, jog didinant spindulį, savasis dažnis, kai gaunamas lenkimas, mažėjo.

Tačiau išorinio žiedo spindulio r_1 (3.10 pav.) keitimas mažai įtakojo savąjį dažnį, kai gaunamas lankstymas, jis beveik nekito ir siekė apie 30 kHz.

Žemiau 3.19 paveiksle pateikiama diagrama vaizduoja pjezokeraminio žiedo savųjų dažnių priklausomybes nuo žiedo išorinio spindulio r_1 (3.10 pav.), kai vidinis spindulys ir aukštis nebuvo keičiamas.

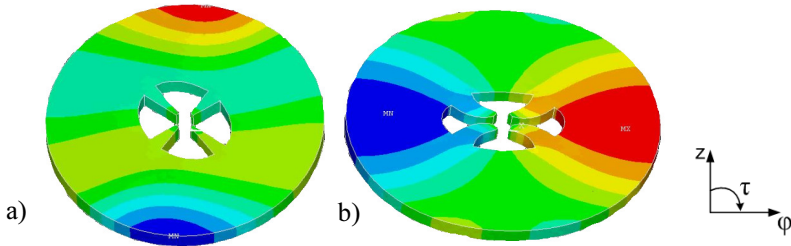


3.19 pav. Žiedo savųjų dažnių priklausomybės nuo žiedo vidinio spindulio
Fig. 3.19. Dependencies of eigenforms of the ring from inner radius of the ring

Papildžius modelį tvirtinimo elementais ir išsprendus savųjų reikšmių uždavinius, atrinktos savosios formos tolimesniems tyrimams pateikiamos 3.20 paveiksle, kai pjezokeraminiame žiede išgautas sukimas ir lenkimas.

Šiame etape buvo keičiamas žiedo tvirtinimo kojelės plotis b (3.11 pav.) intervale nuo 0,0017453 m iki 0,0069813 m.

Norint sužinoti, kokią įtaką turėjo žiedo tvirtinimo elementai savajam dažniui, buvo atliktas pakartotinis pjezokeraminio žiedo skaitinis modeliavimas, prie skirtingų baigtinių elementų tipų bei tinklų.



-17,07	-12,194	-7,316	-2,438	2,44	7,317	12,20	17,073	-17,072
-9,948	-7,106	-4,264	-1,422	1,42	4,262	7,104	10,946	12,788

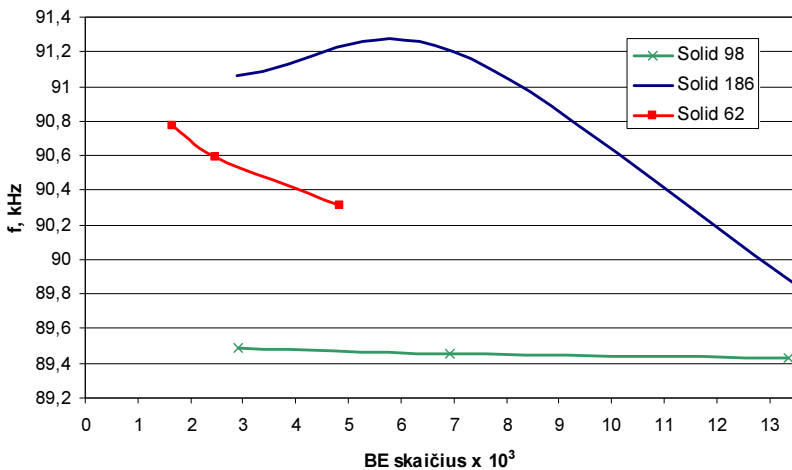
$\times 10^{-7}$ m

3.20 pav. Savosios pjezokeraminių žiedų su tvirtinimo elementais formos, kai buvo pasiektas sukimas ir lenkimas ir buvo keičiamas žiedo tvirtinimo kojelės plotis:

- a) kai savasis dažnis 89,4 kHz, buvo pasiektas sukimas ($b = 0,0034907$ m);
- b) kai savasis dažnis 33,1 kHz, buvo pasiektas lenkimas ($b = 0,005236$ m)

Fig. 3.20. Eigenforms of piezoceramic rings with fortifying elements, when rotation and bending were achieved and the width of fortifying stem was changed:

- a) when eigenfrequency 89.4 kHz, the rotation was achieved ($b = 0.0034907$ m);
- b) when eigenfrequency 33.1 kHz, the bending was achieved ($b = 0.005236$ m)

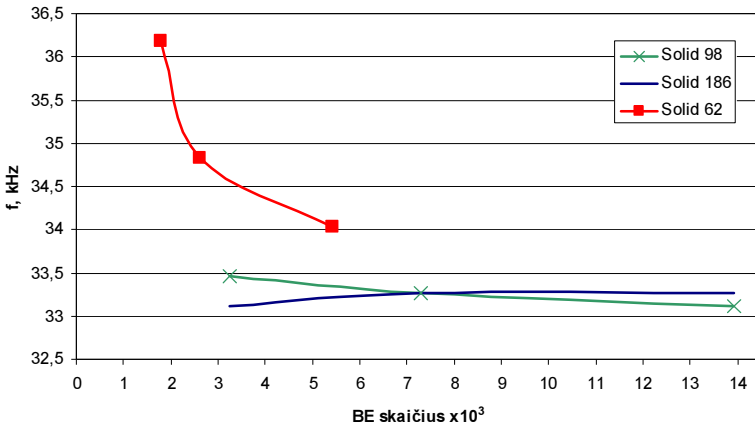


3.21 pav. Žiedo su tvirtinimo elementais, kai buvo gautas sukimas, savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir tinklų

Fig. 3.21. Dependencies of eigenfrequencies of the ring, when the rotation was obtained, from types and meshes of finite elements

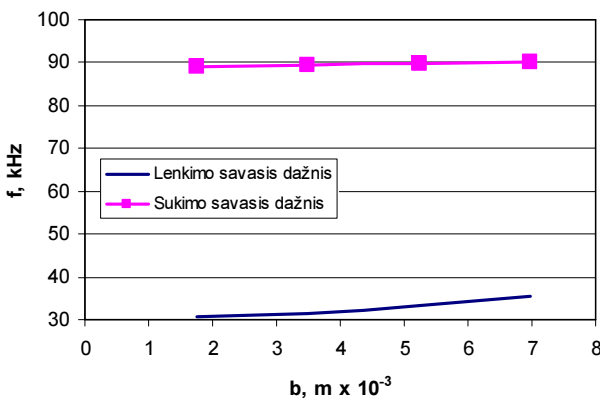
3.21 paveiksle pateiktos pasirinkto žiedo modelio su tvirtinimo elementais, kai buvo gautas sukimas, savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų: SOLID 98, SOLID 186, SOLID 62, kai buvo keičiamas tinklo regionų sutankinimas ir gautas skirtingas baigtinių elementų skaičius.

Tuo tarpu paveiksle 3.22 pateiktos pasirinkto žiedo modelio su tvirtinimo elementais, kai buvo gautas lenkimas, savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir skirtingo baigtinių elementų skaičiaus.



3.22 pav. Žiedo su tvirtinimo elementais, kai buvo gautas lenkimas, savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir tinklų

Fig. 3.22. Dependencies of eigenfrequencies of the ring, when the bending was obtained, from types and meshes of finite elements



3.23 pav. Žiedo savųjų dažnių priklausomybės nuo žiedo tvirtinimo kojėlės pločio

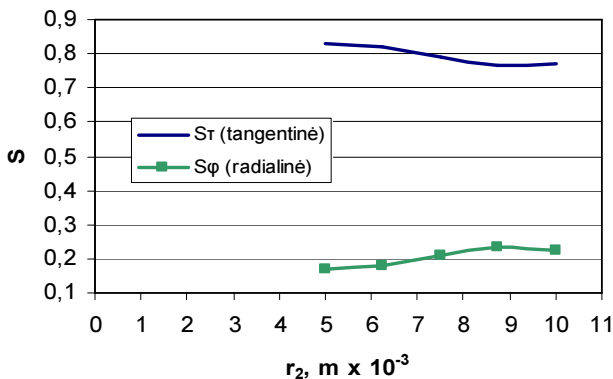
Fig. 3.23. Dependencies of eigenforms of the ring from the width of fortifying stem of the ring

Papildžius modelį tvirtinimo elementais, buvo pastebėta, jog didinant žiedo tvirtinimo kojelės plotį b (3.11 pav.), pjezokeraminio žiedo, kai gaunamas žiedo sukimas ir lenkimas, savasis dažnis didėjo nežymiai.

3.23 paveiksle pateikiama diagrama vaizduoja pjezokeraminio žiedo savųjų dažnių priklausomybes nuo žiedo tvirtinimo kojelės pločio b (3.11 pav.), kai kiti žiedo ir tvirtinimo elementų geometriniai parametrai nebuvo keičiami.

Atliekant pjezokeraminio žiedo modalinę analizę, buvo pastebėta, jog keičiant geometrinius parametrus, pjezokeraminio žiedo savosios formos išgaunamos vis prie kitų dažnių, t. y. pasikeičia savųjų formų vieta jų eilėje. Dalinai problema buvo sprendžiama skaičiuojant dominavimo koeficientus, naudojant (2.31) ir (2.32) formules.

Gautų dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo žiedo vidinio spindulio r_2 (3.9 pav.), kai buvo nagrinėjamas žiedo sukimas, pateikiamos 3.24 paveiksle. Gautos dominavimo koeficientų reikšmės išilgine kryptimi buvo pakankamai mažos, todėl jos nėra įtrauktos į paveikslą. Šioje tyrimo dalyje žiedo aukštis nebuvo keičiamas.



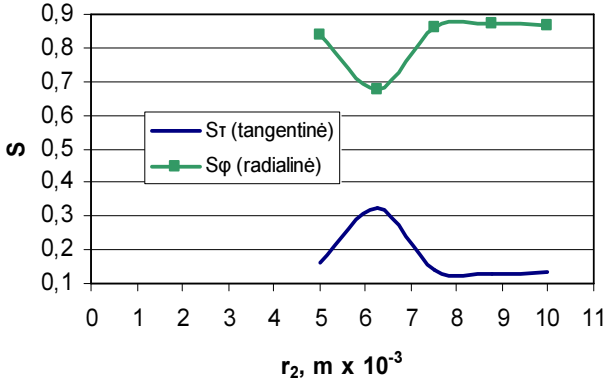
3.24 pav. Pjezokeraminio žiedo vidinio spindulio įtaka dominavimo koeficientams, kai buvo nagrinėjamas žiedo sukimas

Fig. 3.24. The influence of the inner radius of the piezoceramic ring on domination coefficients, when the rotation of the ring was considered

Kaip matyti iš 3.24 paveiksle pateiktų rezultatų, didžiausios dominavimo koeficientų reikšmės gautos tangentine kryptimi, o tai reiškia, kad dominavo sukamieji judesiai.

Pagal pateiktus 3.24 paveiksle rezultatus, žiedo sukimui buvo atrinktas modelis, kurio vidinis spindulys r_2 (3.10 pav.) yra 0,005 m. Jame labiausiai iš penkių ištirtų pjezokeraminio žiedo modelių, kai buvo keičiamas vidinis spindulys, dominavo poslinkiai tangentine kryptimi.

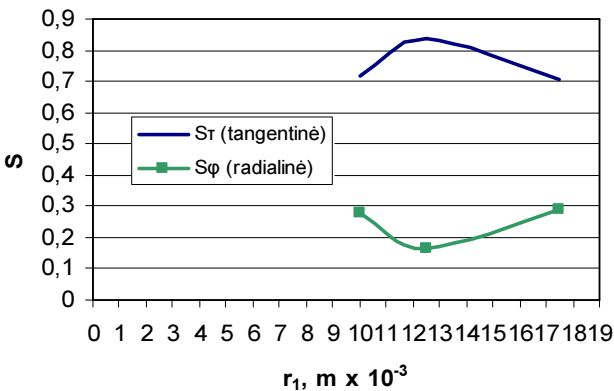
Nagrinęjant žiedo lenkimą, gautos dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo žiedo vidinio spindulio r_2 (3.10 pav.) pateikiamos 3.25 paveiksle.



3.25 pav. Pjezokeraminio žiedo vidinio spindulio įtaka dominavimo koeficientams, kai buvo nagrinėjamas žiedo lenkimas

Fig. 3.25. The influence of the inner radius of the piezoceramic ring on domination coefficients, when the bending of the ring was considered

Pagal 3.25 paveiksle pateiktus rezultatus matoma, jog didžiausi dominavimo koeficientai gauti radialine kryptimi, o tai reiškia, kad dominavo lenkimo judesiai. Remiantis 3.25 paveiksle pateiktais rezultatais žiedo lenkimui buvo atrinktas modelis, kurio vidinis spindulys r_2 (3.10 pav.) yra 0,00875 m. Jame labiausiai iš penkių ištirtų pjezokeraminio žiedo modelių, kai buvo keičiamas vidinis spindulys, dominavo poslinkiai radialine kryptimi.



3.26 pav. Pjezokeraminio žiedo išorinio spindulio įtaka dominavimo koeficientams, kai buvo nagrinėjamas žiedo sukimas

Fig. 3.26. The influence of the outer radius of the piezoceramic ring on domination coefficients, when the rotation of the ring was considered

Taip pat buvo gautos dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo žiedo išorinio spindulio r_l (3.10 pav.), kai buvo nagrinėjamas žiedo sukimas, kurios pateikiamos 3.26 paveiksle.

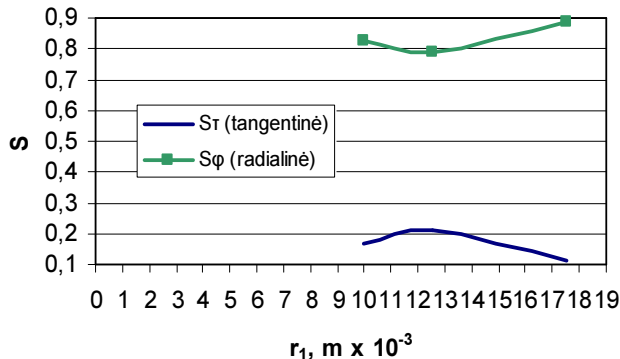
Gautos dominavimo koeficientų reikšmės išilgine kryptimi buvo pakankamai mažos, todėl jos nėra įtrauktos į paveikslą. Šioje tyrimo dalyje žiedo aukštis ir vidinis spindulys nebuvo keičiami.

3.26 paveiksle pagal pateiktus rezultatus matoma, jog didžiausi dominavimo koeficientai buvo gauti tangentine kryptimi, o tai reiškia, kad dominavo reikalingi sukamieji judesiai.

Pagal pateiktus 3.26 paveiksle rezultatus, žiedo sukimui atrinktas modelis, kurio išorinis spindulys r_l (3.10 pav.) yra 0,0125 m. Jame labiausiai iš trijų ištirtų pjezokeraminio žiedo modelių, kai buvo keičiamas išorinis spindulys, dominavo poslinkiai tangentine kryptimi.

3.27 paveiksle pateikiamos dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo žiedo išorinio spindulio r_l (3.10 pav.), kai buvo nagrinėjamas žiedo lenkimas.

Išilgine kryptimi gautos dominavimo koeficientų reikšmės buvo pakankamai mažos, todėl jos nėra įtrauktos į paveikslą. Šioje tyrimo dalyje žiedo aukštis ir vidinis spindulys nebuvo keičiami.



3.27 pav. Pjezokeraminio žiedo išorinio spindulio įtaka dominavimo koeficientams, kai buvo nagrinėjamas žiedo lenkimas

Fig. 3.27. The influence of the outer radius of the piezoceramic ring on domination coefficients, when the bending of the ring was considered

3.27 paveiksle didžiausi dominavimo koeficientai gauti radialine kryptimi, o tai reiškia, kad dominavo lenkimo judesiai. Pagal gautas dominavimo koeficientų reikšmes, buvo atrinktas modelis, kurio išorinis spindulys r_l (3.10 pav.) yra 0,0175 m, tinkantis žiedo lenkimui.

Jame labiausiai iš trijų ištirtų pjezokeraminio žiedo modelių, kai buvo keičiamas išorinis spindulys, dominavo poslinkiai radialine kryptimi.

Įvertinus aštuonių modelių gautas dominavimo koeficientų reikšmes, kai buvo keičiami vidinis ir išorinis spinduliai, žiedo sukimui atrinktas modelis, kurio išorinis spindulys r_1 (3.10 pav.) yra 0,0125 m, jo kontaktinių taškų poslinkiai tangentine kryptimi sudarė 84 %.

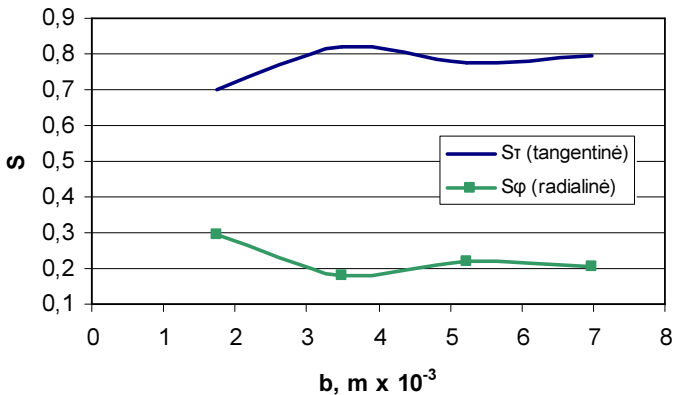
Tuo tarpu žiedo lenkimui – modelis, kurio išorinis spindulys r_1 (3.10 pav.) yra 0,0175 m. Šio modelio kontaktinių taškų poslinkiai radialine kryptimi sudarė 89 %.

Norint sužinoti tvirtinimo elementų įtaką žiedo judėjimui, papildytam žiedo modeliui (3.11 pav.) buvo paskaičiuotos dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo žiedo tvirtinimo kojėlės pločio b .

Šioje tyrimo dalyje kiti žiedo ir tvirtinimo elementų geometriniai parametrai nebuvo keičiami.

Gautos dominavimo koeficientų reikšmės išilgine kryptimi taip pat nebuvo įtrauktos į paveikslus, kaip ir ankstesniuose žiedo tyrimuose.

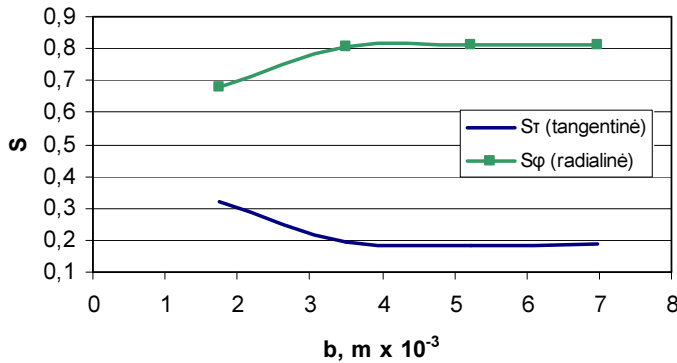
Paveikslas 3.28 atspindi dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybes nuo žiedo tvirtinimo kojėlės pločio b (3.11 pav.), kai buvo nagrinėjamas žiedo sukimas.



3.28 pav. Pjezokeraminio žiedo tvirtinimo kojėlės pločio įtaka dominavimo koeficientams, kai buvo nagrinėjamas žiedo sukimas

Fig. 3.28. The influence of the width of fortifying stem of the piezoceramic ring on domination coefficients, when the rotation of the ring was considered

Tuo tarpu paveikslas 3.29 atspindi dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybes nuo žiedo tvirtinimo kojėlės pločio b , kai buvo nagrinėjamas žiedo lenkimas.



3.29 pav. Pjezokeraminio žiedo tvirtinimo kojelės pločio įtaka dominavimo koeficientams, kai buvo nagrinėjamas žiedo lenkimas

Fig. 3.29. The influence of the width of fortifying stem of the piezoceramic ring on domination coefficients, when the bending of the ring was considered

Nagrinėjant 3.28 ir 3.29 paveiksluose pateiktus rezultatus, buvo pastebėta, jog tvirtinimas sumažino žiedo kontaktinių taškų judėjimo poslinkius tiek tangentine, tiek radialine kryptimis. Kaip matyti iš 3.28 paveiksle pateiktų rezultatų mažiausiai neigiamos įtakos žiedo sukimui padarė modelis, kurio tvirtinimo kojelės plotis b (3.11 pav.) yra 0,0034907 m. Šiame modelyje kontaktinių taškų poslinkiai tangentine kryptimi sudarė 82 % (t. y. 1 % mažiau negu modelyje be tvirtinimo elementų). Tuo tarpu pagal 3.29 paveiksle pateiktus rezultatus mažiausiai neigiamos įtakos žiedo lenkimui padarė modelis, kurio tvirtinimo kojelės plotis b (3.11 pav.) yra 0,005236 m. Šiame modelyje kontaktinių taškų poslinkiai radialine kryptimi sudarė 81 % (t. y. 8 % mažiau negu modelyje be tvirtinimo elementų). Taigi tvirtinimo elementai daugiausiai neigiamo poveikio turėjo žiedo lenkimo judesiams.

3.2.2. Žiedo formos pjezokeitiklių analizė esant harmoniniam žadinimui

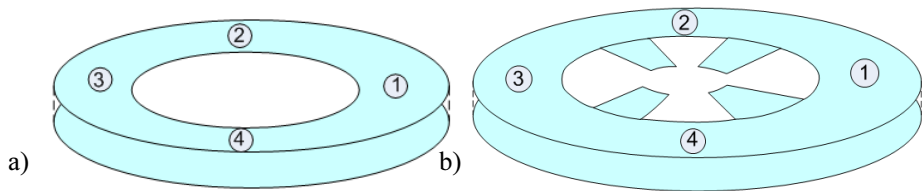
Kitas žingsnis pjezokeitiklio modeliavimo procese buvo rasti žiedo formos pjezokeitiklio veikimo rezonansinius dažnius, pasirinktame žadinimo dažnių spektre, bei nustatyti parinktų kontaktinių taškų elipsines judesio trajektorijas. Vėliau buvo ištirtas papildytas tvirtinimo elementais pjezokeraminis žiedo modelis ir pamatuota tvirtinimo elementų įtaka parinktų kontaktinių taškų elipsinėms judesio trajektorijoms.

Šiame tyrimų etape buvo nagrinėjamos žadinamos, pagal pateiktą 3.12 paveiksle elektrodų konfigūraciją, žiedo viršutinėje dalyje parinktų kontaktinių taškų elipsinės judėjimo trajektorijos pagal x , z ir y , z ašis.

Buvo įvertinti jų didžiosios ir mažosios ašies santykiniai dydžiai, bei sukimosi kampai, nustatytos didžiausios santykinės reikšmės. Šioje tyrimo dalyje medžiagos slopinimas buvo vertinamas modeliuose. Medžiagos PZT-8 charakteristikos naudojamos modeliuojant žiedus, pateiktos 1 lentelėje A prieduose. Šiame etape tyrimų rezultatai pateikiami dekartio plokštumos koordinatinių sistemoje.

Žiedo sukimo judesių analizei buvo pasirinktas 80–120 kHz žadinimo įtampos dažnio kitimo intervalas su 10 kHz dažnių kitimo žingsniu. Tuo tarpu žiedo lenkimų judesių analizei buvo pasirinktas 20–40 kHz žadinimo įtampos dažnio kitimo intervalas su 5 kHz dažnių kitimo žingsniu.

Detalus tyrimai buvo atliekami keturiems taškams, esantiems viršutinėje žiedo dalyje. Parinktų kontaktinių taškų išdėstymas pateikiamas 3.30 paveiksle.



3.30 pav. Pjezokeraminių žiedų viršutinėje dalyje parinkti taškai, detalesniam poslinkių ir jų krypčių tyrimui: a) Pjezokeraminis žiedas be tvirtinimo elementų; b) Pjezokeraminis žiedas su tvirtinimo elementais

Fig. 3.30. The selected contact points at the upper part of the ring for detailed displacement and their movement investigation: a) Piezoceramic ring without fortifying elements; b) Piezoceramic ring with fortifying elements

Šio tyrimo metu pjezokeraminių žiedų elipsinių kontaktinių taškų judesio trajektorijų nustatymui buvo naudojama (2.34) formulė.

Analizuojant pjezokeraminių žiedų sukimo ir lenkimo judėjimus, kurie buvo žadinami pagal pateiktą 3.12 paveiksle elektrodų konfigūraciją, įvertinus viršutinėje dalyje parinktų kontaktinių taškų (3.30 pav.) santykius tarp didžiosios ir mažosios elipsės ašies, buvo nustatyta, jog amplitudžių pikai buvo pasiekti rezonansiniame dažnyje.

Taip pat buvo pastebėta, jog skirtingų taškų sukimosi kampas skirtingose vietose žymiai skiriasi rezonansiniame dažnyje, o tuo tarpu tostant nuo rezonanso, visų pasirinktų taškų sukimosi kampas artėjo prie konkrečios reikšmės.

Pagal tai buvo padarytos prielaidos, jog pjezokeraminių žiedų viršutinėje dalyje parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos artėjo prie rezonanso kreivės ir buvo pasiekti sukimo ir lenkimo judėjimai.

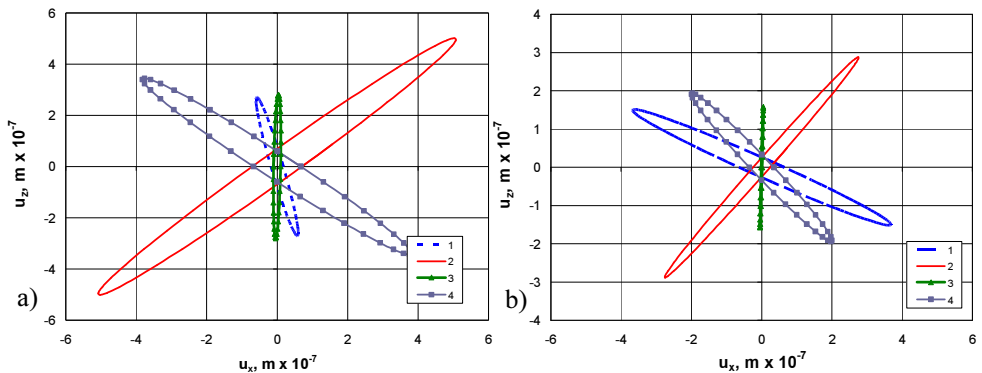
Nagrinėjant viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis, buvo pastebėta, jog prie skirtingų dažnių judėjimo trajektorijų kryptys skiriasi. Todėl buvo padaryta dar viena prielaida, jog savieji dažniai gerai parinkti sukimo ir lenkimo judesiams gauti.

Skaičiuojant elipsinių kontaktinių taškų judesio trajektorijas, žiedo žadinimui buvo naudojama elektrodų schema, pateikta 3.12 paveiksle, elektrodams paduodant 30 V įtampą.

Išnaginęje viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis, įvertinę jų didžiosios ir mažosios ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus prie skirtingų dažnių, žiedo sukimui buvo pasirinktas modelis, kai pjezokeraminio žiedo išorinis spindulys r_1 (3.10 pav.) yra 0,0125 m. ir yra žadinamas 107,4 kHz dažniu.

Jei žiedo konstrukcija turi turėti tvirtinimo elementus, tai sukamojo judėjimo aktyvumo mažiausius nuostolius padaro tvirtinimo elementas, kurio tvirtinimo kojelės plotis b (3.11 pav.) yra 0,0034907 m ir žiedas žadinamas 89,4 kHz dažniu.

Vidinės žiedo dalies tvirtinimas turėjo ir teigiamos įtakos žiedo sukimui, jam generuoti prireikė mažesnio dažnio. Tvirtinimo elementai riboja judėjimą x ašies kryptimi ir leido išgauti sukimo judėjimą prie mažesnio savojo dažnio.



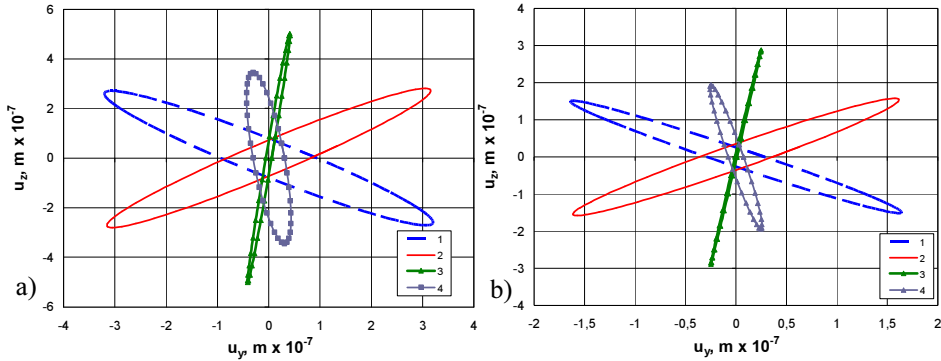
3.31 pav. Viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal x , z ašis, kai buvo pasiektas sukimas: a) Nagrinėjamas žiedo modelis be tvirtinimo elementų, kurio išorinis spindulys r_1 yra 0,0125 m, kai savasis dažnis 107,4 kHz; b) Nagrinėjamas žiedo modelis su tvirtinimo elementais, kurio tvirtinimo kojelės plotis b yra 0,0034907 m, kai savasis dažnis 89,4 kHz.

Fig. 3.31. Movement trajectories of the selected points in the upper part of the ring on x , z axes, when the rotation was achieved: a) Ring model without fortifying elements, when the outer radius r_1 is 0.0125 m and eigenfrequency 107.4 kHz; b) Ring model with fortifying elements, when the width of fortifying stem b is 0.0034907 m and eigenfrequency 89.4 kHz

3.31 paveikslas vaizduoja viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) judėjimo trajektorijas pagal x , z ašis, kai buvo pasiektas sukimas.

Analizuojant elipsių trajektorijų reikšmes pagal x ašį 2-ajame ir 4-ajame viršutinėje žiedo dalyje parinktuose taškuose (3.30 pav.) gautos didžiausios santykinės reikšmės.

3.32 paveikslas vaizduoja viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) judėjimo trajektorijas pagal y , z ašis, kai buvo pasiektas sukimas.



3.32 pav. Viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal y , z ašis, kai buvo pasiektas sukimas: a) Nagrinėjamas žiedo modelis be tvirtinimo elementų, kurio išorinis spindulys r_1 yra 0,0125 m ir savasis dažnis 107,4 kHz; b) Nagrinėjamas žiedo modelis su tvirtinimo elementais, kurio tvirtinimo kojėlės plotis b yra 0,0034907 m ir savasis dažnis 89,4 kHz

Fig. 3.32. Movement trajectories of the selected points in the upper part of the ring on x , z axes, when the rotation was achieved: a) Ring model without fortifying elements, when the outer radius r_1 is 0.0125 m and eigenfrequency 107.4 kHz; b) Ring model with fortifying elements, when the width of fortifying stem b is 0.0034907 m and eigenfrequency 89.4 kHz

Analizuojant elipsių trajektorijų reikšmes pagal y ašį 1-ajame ir 2-ajame viršutinėje žiedo dalyje parinktuose taškuose (3.30 pav.) gautos didžiausios santykinės reikšmės.

Elipsės, kurios buvo gautos prie 107,4 kHz savojo dažnio, kai žiedo modelis neturėjo tvirtinimo elementų, turėjo didesnę didžiąją ašį ir apėmė didesnę plotą negu prie 89,4 kHz, kai žiedo modelis turėjo tvirtinimo elementus.

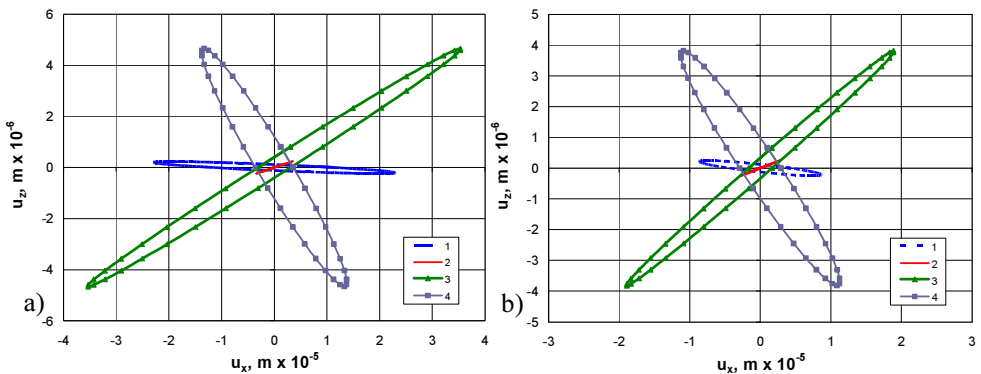
Pagal tai buvo nustatyta, jog prie 107,4 kHz savojo dažnio, kai žiedo modelis neturėjo tvirtinimo elementų, viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) judėjimas buvo aktyvesnis, bei amplitudės pikas, atitinkamai, buvo galingesnis, negu prie 89,4 kHz, kai žiedo modelis turėjo tvirtinimo elementus.

Išnagrinėję viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis, įvertinę jų didžiosios ir mažosios

ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus prie skirtingų dažnių, žiedo lenkimui buvo pasirinktas modelis, kai pjezokeraminio žiedo išorinis spindulys r_l (3.10 pav.) yra 0,0175 m ir yra žadinamas 29,2 kHz dažniu

Jei žiedo konstrukcija turi turėti tvirtinimo elementus, tai lenkiamojo judėjimo aktyvumo mažiausius nuostolius padaro tvirtinimo elementas, kurio tvirtinimo kojelės plotis b (3.11 pav.) yra 0,005236 m ir žiedas žadinamas 33,1 kHz dažniu.

3.33 paveikslas vaizduoja viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) judėjimo trajektorijas pagal x , z ašis, kai buvo pasiektas lenkimas.



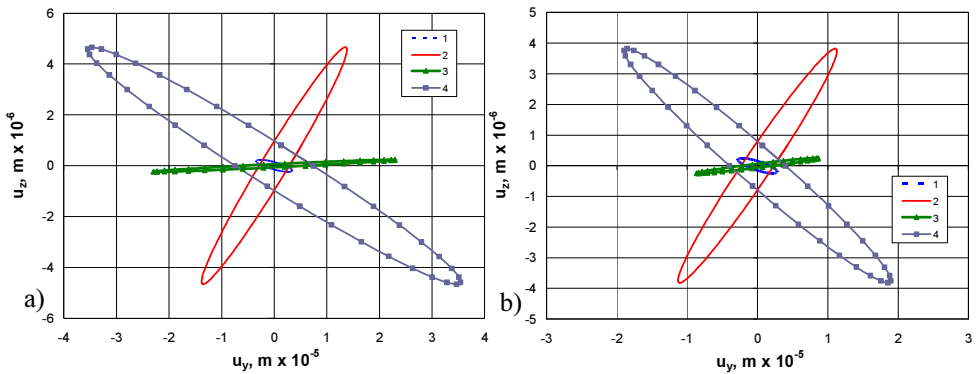
3.33 pav. Viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal x , z ašis, kai buvo pasiektas lenkimas: a) Nagrinėjamas žiedo modelis be tvirtinimo elementų, kurio išorinis spindulys r_l yra 0,0175 m ir savasis dažnis 29,2 kHz; b) Nagrinėjamas žiedo modelis su tvirtinimo elementais, kurio tvirtinimo kojelės plotis b yra 0,005236 m ir savasis dažnis 33,1 kHz

Fig. 3.33. Movement trajectories of the selected points in the upper part of the ring on x , z axes, when the bending was achieved: a) Ring model without fortifying elements, when the outer radius r_l is 0.0175 m and eigenfrequency 29.2 kHz; b) Ring model with fortifying elements, when the width of fortifying stem b is 0.005236 m and eigenfrequency 33.1 kHz

3.34 paveikslas vaizduoja viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) judėjimo trajektorijas pagal y , z ašis, kai buvo pasiektas lenkimas.

Analizuojant elipsių trajektorijų reikšmes pagal x , y ašis 3-ajame ir 4-ajame viršutinėje žiedo dalyje parinktuose taškuose (3.30 pav.) gautos didžiausios santykinės reikšmės.

Tačiau papildžius žiedo modelį tvirtinimo elementais, elipsių trajektorijų didžiausios santykinės reikšmės pagal y ašį gautos 2-ajame ir 4-ajame viršutinėje žiedo dalyje parinktuose taškuose (3.30 pav.).



- 3.34 pav.** Viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal y , z ašis, kai buvo pasiektas lenkimas: a) Nagrinėjamas žiedo modelis be tvirtinimo elementų, kurio išorinis spindulys r_1 yra 0,0175 m ir savasis dažnis 29,2 kHz; b) Nagrinėjamas žiedo modelis su tvirtinimo elementais, kurio tvirtinimo kojelės plotis b yra 0,005236 m ir savasis dažnis 33,1 kHz

Fig. 3.34. Movement trajectories of the selected points in the upper part of the ring on y , z axes, when the bending was achieved: a) Ring model without fortifying elements, when the outer radius r_1 is 0.0175 m and eigenfrequency 29.2 kHz
b) Ring model with fortifying elements, when the width of fortifying stem b is 0.005236 m and eigenfrequency 33.1 kHz

Elipsės, kurios buvo gautos prie 29,2 kHz savojo dažnio, kai žiedo modelis neturėjo tvirtinimo elementų, turėjo didesnę didžiąją ašį ir apėmė didesnę plotą negu prie 33,1 kHz, kai žiedo modelis turėjo tvirtinimo elementus.

Pagal tai buvo nustatyta jog prie 29,2 kHz savojo dažnio, kai žiedo modelis neturėjo tvirtinimo elementų, viršutinėje žiedo dalyje parinktų taškų (3.30 pav.) judėjimas bus aktyvesnis, bei amplitudės pikas, atitinkamai, bus galingesnis, negu prie 33,1 kHz, kai žiedo modelis turėjo tvirtinimo elementus.

Pastebėta, jog kontaktinių taškų, kurių elipsės turi didesnę didžiąją ašį ir apima didesnę plotą, judėjimas buvo aktyvesnis, bei amplitudės pikas, atitinkamai, buvo galingesnis.

Pagal elipsių sukimosi kampus buvo nustatyta, kuria kryptimi, pagal x , z ir y , z ašių koordinatinių sistemą, judės kontaktiniai taškai.

Nanometrines skyros mikrorobotų žiedo formos pjezokeitiklių analizėje, esant harmoniniam žadinimui, gauti rezultatai patvirtino gautus rezultatus modalinėje dalyje.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, jog darbe pasiūlyta racionalių geometrinių parametrų ir kontaktinių taškų judėjimo trajektorijų nustatymo metodika leido sukurti nanometrines skyros mikrorobotų stačiakampio ir žiedo formos pjezokeitiklių originalius skaitinio uždavinio sprendimo algoritmus.
2. Gauti rezultatai patvirtino, jog skaitinio modelio tikslumas priklauso nuo baigtinių elementų tinklo tankio, t. y. lygčių skaičiaus.
3. Baigtinių elementų tinklo generavimas leido automatizuotai nagrinėti plokštuminių nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitinius modelius su skirtingais tinklo tankiais, ko pasekoje užsibrėžtas tikslumas buvo pasiektas per trumpesnę laiką.

4

Erdvinių pjezokeitiklių skaitiniai modeliai

Šiame skyriuje aprašyti sukurti ir ištirti nanometrines skyros mikrorobotų cilindro formos pjezokeitiklių ir aktyvios atramos skaitiniai modeliai.

Nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių dinamikos uždaviniai buvo sprendžiami baigtinių elementų metodu. Skaičiavimai buvo atlikti naudojantis baigtinių elementų metodo programiniu paketu ANSYS 10 ir autoriaus sukurtomis programomis.

Atlikus nanometrines skyros mikrorobotų cilindro formos pjezokeitiklių ir aktyvių atramų skaitinį modeliavimą, pateikti diskretiniai modeliai, naudojamos elektrodų konfigūracijos. Nustatyti racionalūs geometriniai parametrai, išspręsti savųjų reikšmių uždaviniai, išnagrinėtos parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos. Savųjų formų atpažinimui buvo naudojami globaliniai dominavimo koeficientai.

Tyrimo metu buvo modeliuojama bėganti banga, kuri buvo žadinama cilindro viršutinėje dalyje esant harmoniniam žadinimui. Taip pat pateikti aktyvios atramos rezonansiniai dažniai, esant harmoniniam žadinimui, pasirinktame žadinimo dažnių spektre, kurie užtikrina volo sukimą, bei judėjimą išilgai volo ašį. Rasti aktyvios atramos disko išpjovos sienelės dalyje esantys kontaktiniai taškai, kurie užtikrina kontaktą su volu.

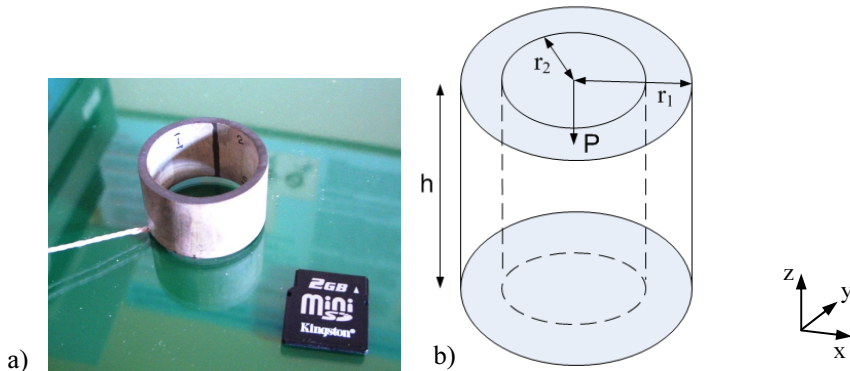
Tiriant trajektorijų charakteristikas buvo naudojami lyginamosios analizės metodai. Apibendrinant gautus rezultatus ir pateikiant praktines rekomendacijas buvo taikomi apibendrinimo metodai.

Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Grigoravičius 2012; 2013a; 2013c).

4.1. Cilindro formos pjezokeitiklių modeliavimas

Šiame skyriuje buvo tiriamas pjezokeraminis cilindras su trimis laisvės laipsniais, kurio schema pateikta 4.1 paveiksle. Nagrinėjamame pjezokeraminiame cilindre buvo žadinama bėganti banga, kuri įgalina sistemą pozicionuoti plokštumoje norima kryptimi, kilnoti masę padėtą ant cilindro. Tokios sistemos pritaikomumas yra gan platus, ji gali būti naudojama pozicionavimo sistemose, judančiose robotų dalyse, lazerių spinduliams nukreipti.

Tiriant nanometrines skyros mikrorobotų cilindro formos pjezokeitiklį, buvo atsizvelgiama, jog jis bus taikomas kompleksinėse sistemose, sujungiant kelis pjezokeitiklius į vieną sistemą, tokiu būdu didinant sistemos laisvės laipsnių skaičių.



4.1 pav. Modelio schemas: a) Eksperimentinio modelio schema

(Bansevicius 2007); b) Cilindro schema ir pradiniai geometriniai parametrai:

$\{P\}$ – poliarizacijos vektoriaus kryptis, h – cilindro aukštis (0,03 m), r_1 – cilindro išorinis spindulys (0,015 m), r_2 – cilindro vidinis spindulys (0,0125 m)

Fig. 4.1. Model schemes: a) the scheme of the experimental model; b) the scheme of cylinder and initial geometrical parameters: $\{P\}$ – the vector of polarisation, h – cylinder height (0.03 m), r_1 – outer radius (0.015 m), r_2 – inner radius (0.0125 m)

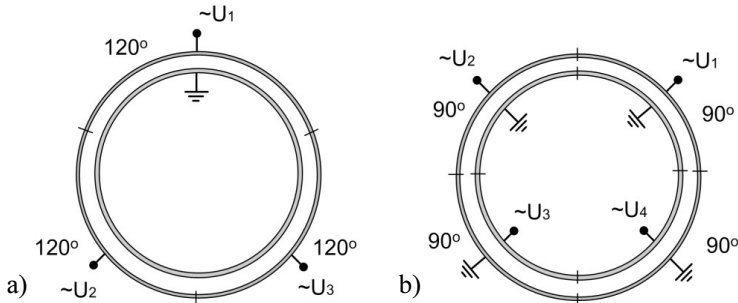
Modeliuojant pjezokeraminį cilindrą jam buvo nustatytos PZT-8 (<http://www.ferroperm-piezo.com>) pjezokeraminės medžiagos savybės, poliarizacijos vektorius buvo nukreiptas išilgai cilindro aukščio.

Detalios PZT-8 medžiagos savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant pjzokeraminį cilindrą, pateiktos 1 lentelėje A prieduose.

Šiame tyrime bėganti banga, esanti cilindro viršuje, buvo žadinama dviem skirtingomis elektrodų konfigūracijomis.

Naudojant pirmą elektrodų konfigūraciją bėganti banga, esanti cilindro viršuje, buvo generuojama simetriškai. Tokiam generavimui užtikrinti išorinė cilindro dalis buvo padalinta į tris sekcijas. Tuo tarpu vidinė cilindro dalis turėjo vieną išsinesę sekciją. Išorinės sekcijos paviršiai buvo padengti elektrodais prie kurių buvo prijungta 30 V įtampa. Vidinės dalies sekcijoje esantis elektrodas buvo įžemintas. Detalesnę pirmos elektrodų konfigūracijos schemą galima pamatyti 4.2 paveiksle, a.

Antra elektrodų konfigūracija buvo naudojama asimetriniam bėgančios bangos, esančios cilindro viršuje, generavimui. Tokiam generavimui užtikrinti išorinė ir vidinė cilindro dalys buvo padalintos į keturias lygias sekcijas. Elektrodai buvo sujungti tokiu principu, jei prie išorinės cilindro dalies sekcijos elektrodo prijungta įtampa, tai lygiagrečios vidinės cilindro dalies sekcijos elektrodas įžemintas ir atvirkščiai, jei išorinės cilindro dalies sekcijos elektrodas įžemintas, tai prie vidinės cilindro dalies sekcijos elektrodo prijungta įtampa. Detalesnę antros elektrodų konfigūracijos schemą galima pamatyti 4.2 paveiksle, b.



4.2 pav. Elektrodų išdėstymo schema bėgančiai bangai generuoti. Elektrodų topologija: a) bangai simetriškai generuoti; b) bangai asimetriškai generuoti

Fig. 4.2. The scheme of electrodes placement generating the travelling wave. Electrodes topology: a) to generate the wave symmetrically; b) to generate the wave asymmetrically

Pradiniame tyrimo etape buvo nustatomi racionalūs pjzokeraminio cilindro geometriniai parametrai. Parenkant pjzokeraminio cilindro geometrinius parametrus buvo atsižvelgiama, jog bėganti banga, esanti cilindro viršuje, užtikrintų pjzokeraminio cilindro judėjimą plokščiu paviršiumi.

Bėganti banga buvo gaunama naudojant išilginį cilindro judėjimą bei cilindro sukimą. Todėl norint užtikrinti bėgančios bangos efektyvumą, bei greitaveiką, buvo stengiamasi gauti išilginį judėjimą bei sukimą prie kuo

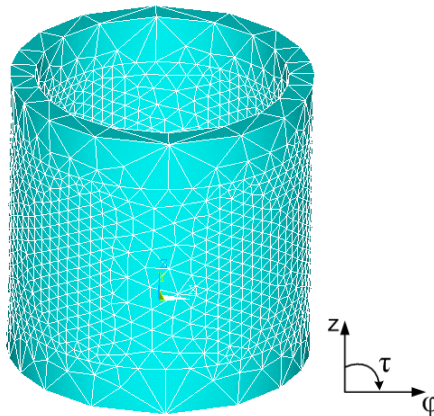
didesnių savųjų dažnių. Tyrimo metu taip pat buvo siekiama, jog gauti cilindro formos modeliai atitiktų keliamus techninius sistemos reikalavimus ir būtų racionalūs technologiniu požiūriu.

Kiekvienam nagrinėjamam modeliui buvo sprendžiamas savųjų reikšmių uždavinys, gauti savieji sistemos dažniai. Savųjų formų atpažinimui buvo suskaičiuoti globaliniai dominavimo koeficientai. Žemiau pateikiama detalesnė analizė.

4.1.1. Cilindro formos pjezokeitiklių savųjų reikšmių uždavinys

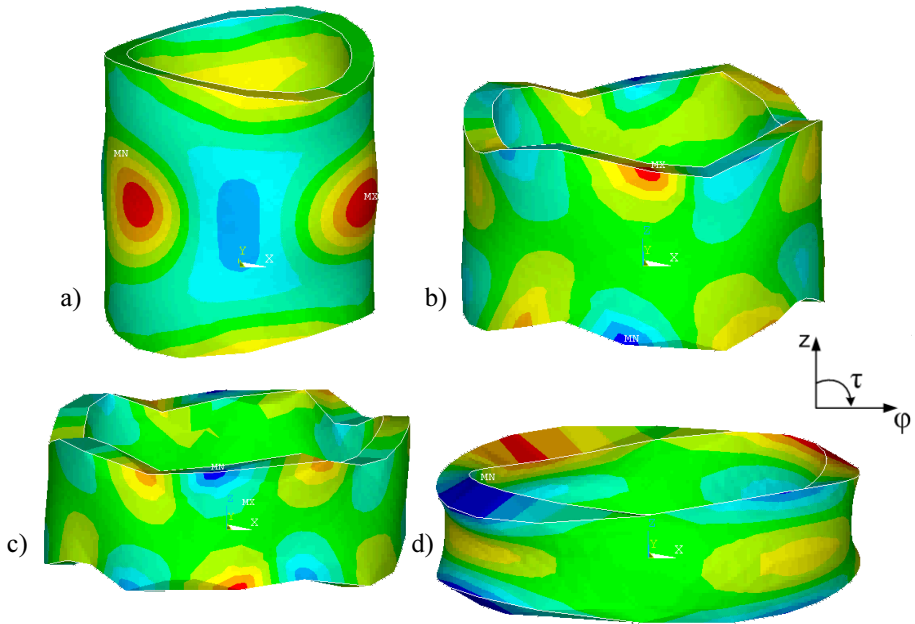
Sudarant nanometrines skyros mikrorobotų cilindro formos pjezokeitiklių baigtinių elementų modelį (BEM), buvo pasirinktas SOLID 98, SOLID 186 (ANSYS programos žymėjimas) baigtinių elementų tipas. Detalesnės šių baigtinių elementų tipų charakteristikos, dėl kurių buvo pasirinkti būtent šitie tipai, yra pateiktos A prieduose.

Pjezokeraminio cilindro, kurio modeliavimui buvo naudojami pradiniai geometriniai parametrai, baigtinių elementų modelis pateiktas 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Pjezokeraminio cilindro BEM
Fig. 4.3. FEM of piezoceramic cylinder

Tyrimo modalinėje dalyje, nustatant racionalius pjezokeraminio cilindro geometrinius parametrus, detaliai buvo išnagrinėti keturi modeliai. Geometrinių matmenų santykiams užtikrinti, cilindro aukštis h (4.1 pav.) buvo parinktas kaip keičiamas dydis. Jo pradinė reikšmė 0,03 m buvo keičiama intervale nuo 0,0075 m iki 0,03 m.



-4,691	-3,355	-2,019	-0,683	0,653	1,989	3,325	4,661	5,997
-3,716	-2,169	-1,263	-0,657	0,411	1,68	2,565	3,171	-3,716
-2,76	-1,69	-0,63	-0,557	0,511	0,58	1,65	2,71	3,78
-1,563	-1,75	-0,753	-0,557	0,326	0,5373	0,987	1,441	-1,563

$\times 10^{-6}$ m

4.4 pav. Pjezokeraminio cilindro gautos savosios formos esant skirtingam aukščiui h : a) kai savasis dažnis 59,1 kHz, pjezokeraminio cilindro aukštis $h = 0,03$ m; b) kai savasis dažnis 88,6 kHz, pjezokeraminio cilindro aukštis $h = 0,015$ m; c) kai savasis dažnis 107,6 kHz, pjezokeraminio cilindro aukštis $h = 0,01$ m; d) kai savasis dažnis 129,2 kHz, pjezokeraminio cilindro aukštis $h = 0,0075$ m

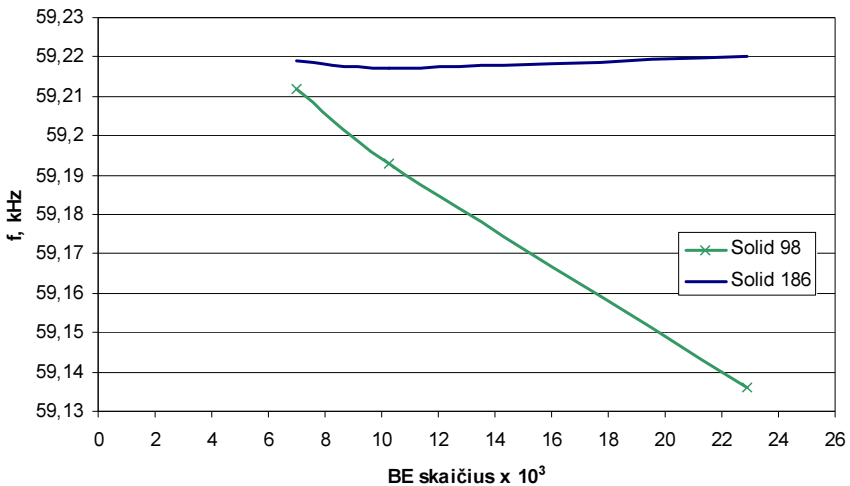
Fig. 4.4. The obtained eigenforms of the piezoceramic cylinder at different height h : a) when eigenfrequency is 59.1 kHz, the height of piezoceramic cylinder is $h = 0.03$ m; b) when eigenfrequency is 88.6 kHz, the height of piezoceramic cylinder is $h = 0.015$ m; c) when eigenfrequency is 107.6 kHz, the height of piezoceramic cylinder is $h = 0.01$ m; d) when eigenfrequency 129.2 kHz, the height of piezoceramic cylinder is $h = 0.0075$ m

Pjezokeraminio cilindro savųjų reikšmių uždavinys buvo sprendžiamas naudojant Block Lanczos sprendiklį. Kiekvienam pjezokeraminio cilindro baigtinių elementų modeliui buvo skaičiuojama po 60 savųjų dažnių ir formų. Sprendžiant pjezokeraminių cilindrų savųjų reikšmių uždavinius, medžiagos slopinimas nebuvo vertinamas modeliuose. Detalios PZT-8 medžiagos savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant pjezokeraminius cilindrus, pateiktos 1 lentelėje A prieduose.

Elektrodų konfigūracija, pagal kurią buvo atliekami bėgančios bangos žadinimai, pateikta 4.2 paveiksle, a.

Šiame skyriuje tyrimų rezultatai pateikiami cilindrinėje koordinačių sistemoje, nes taip jie tiksliau nusako virpesių charakterį. Normuotos pagal masių matricą, virpesių amplitudės iš stačiakampės koordinačių sistemos pervedamos į cilindrinę, paketo ANSYS pagalba. Tokia transformacija yra nesunkiai atliekama, kadangi skaičiavimų rezultatai saugomi lokalinėje elemento koordinačių sistemoje. Išsprendus savųjų reikšmių uždavinius, gautos savosios pjezokeraminių cilindrų, kai buvo keičiamas aukštis h (4.1 pav.) intervale nuo 0,0075 m iki 0,03 m formos, pateikiamos 4.4 paveiksle.

Cilindro skaitinių sprendinių tikslumas, buvo ištirtas prie skirtingų baigtinių elementų tipų bei tinklų.



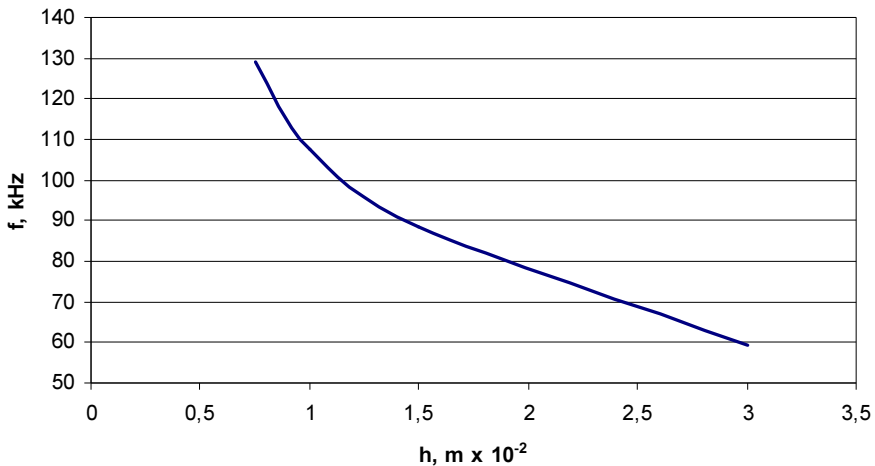
4.5 pav. Cilindro savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir tinklų
Fig. 4.5. Dependencies of eigenfrequencies of the cylinder on types and meshes of finite elements

4.5 paveiksle pateiktos pasirinkto cilindro modelio savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų: SOLID 98, SOLID 186, kurios

gautos prie skirtingo baigtinių elementų skaičiaus (keičiant tinklo regionų sutankinimą).

Atliekant pjezokeraminio cilindro skaitinį modeliavimą, parinkinėjant skirtingus geometrinių matmenų santykius, buvo pastebėta, jog mažinant cilindro aukštį h (4.1 pav.) pjezokeraminio cilindro savasis dažnis didėjo. Dėl šios priklausomybės galima daryti prielaidą, jog kuo siauresnis cilindras, tuo intensyviau reikia žadinti, kad išgauti bėgančią bangą, užtikrinančią pjezokeraminio cilindro judėjimą plokštuma.

Žemiau 4.6 paveiksle pateikiama diagrama vaizduoja pjezokeraminio cilindro savųjų dažnių priklausomybes nuo cilindro aukščio h (4.1 pav.), kai vidinio ir išorinio spindulių (4.1 pav.) geometriniai parametrai nebuvo keičiami.

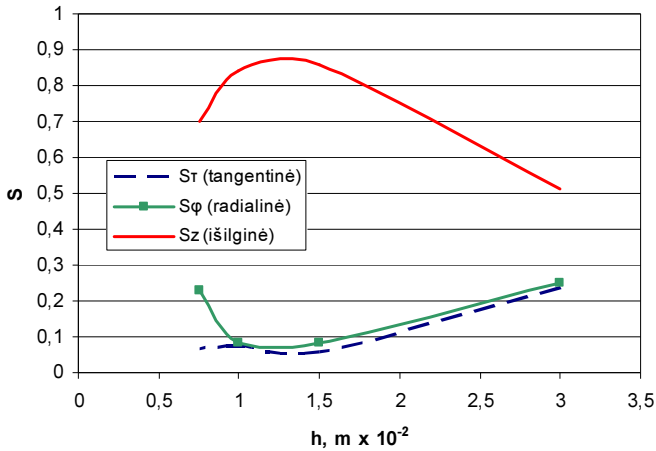


4.6 pav. Cilindro savųjų dažnių priklausomybės nuo cilindro aukščio h
Fig. 4.6. Dependencies of eigenforms of cylinder on the height h of cylinder

Atliekant pjezokeraminio cilindro modalinę analizę, buvo pastebėta, jog keičiant geometrinius parametrus, pjezokeraminio cilindro savosios formos išgaunamos vis prie kitų dažnių, t. y. pasikeičia savųjų formų vieta jų eilėje.

Dalinai problema buvo sprendžiama skaičiuojant dominavimo koeficientus, naudojant (2.31) ir (2.32) formules.

Gautų dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo cilindro aukščio h (4.1 pav.), kai vidinio ir išorinio spindulių (4.1 pav.) geometriniai parametrai nebuvo keičiami, pateikiamos 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Pjezokeraminio cilindro aukščio įtaka dominavimo koeficientams
Fig. 4.7. The influence of height of piezoceramic cylinder to domination coefficients

Kaip matyti iš 4.7 paveiksle pateiktų rezultatų, didžiausi dominavimo koeficientai gauti tangentine ir išilgine kryptimis, o tai reiškia, kad dominavo sukamieji ir išilginiai judesiai, kurie buvo reikalingi bėgančiai bangai sudaryti.

Išanalizavus geometrinių parametrų įtaką dominavimo koeficientams, bei saviesiems dažniams, remiantis gautais rezultatais bėgančiai bangai formuoti buvo pasirinktas pjezokeraminio cilindro modelis, kurio aukštis h (4.1 pav.) yra 0,03 m.

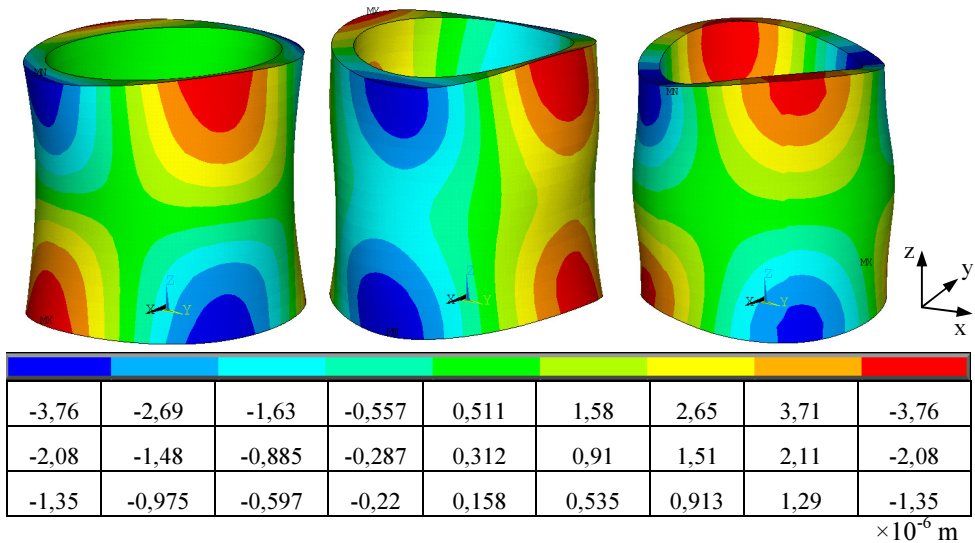
4.1.2. Cilindro formos pjezokeitiklių bėgančios bangos analizė esant harmoniniam žadinimui

Kitas žingsnis pjezokeraminio cilindro skaitinio modeliavimo procese buvo bėgančios bangos analizės uždavinys esant harmoniniam žadinimui. Šio uždavinio tikslas – nustatyti nanometrinės skyros mikrorobotų cilindro formos pjezokeitiklių rezonansinius dažnius, pasirinktame žadinimo dažnių spektre ir parinktų kontaktinių taškų elipsines judesio trajektorijas.

Šiame tyrimų etape buvo nagrinėjamos žadinamos pagal pateiktas 4.2 paveiksle, a ir 4.2 paveiksle, b elektrodų konfigūracijos, pjezokeraminio cilindro viršutinėje dalyje parinktų kontaktinių taškų elipsinės judėjimo trajektorijos pagal x , z ir y , z ašis, įvertinant jų didžiosios ir mažosios ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus, buvo nustatytos didžiausios santykinės reikšmės. Taip pat buvo patikslinti rezonansiniai dažniai pasirinktame žadinimo dažnių spektre.

Šioje tyrimo dalyje medžiagos slopinimas buvo vertinamas modeliuose. Detalios PZT-8 medžiagos savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant pjezokeraminį cilindrą, pateiktos 1 lentelėje A prieduose. Šiame skyriuje tyrimų rezultatai pateikiami dekartio plokštumos koordinačių sistemoje.

Išsprendus savųjų reikšmių uždavinius, gautos savosios pjezokeraminių cilindrų formos, prie kurių išgaunama bėganti banga esant harmoniniam žadinimui, pateikiamos 4.8 paveiksle.



4.8 pav. Pjezokeraminių cilindrų savosios formos, prie kurių išgaunama bėganti banga esant harmoniniam žadinimui: a) kai savasis dažnis 23,4 kHz; b) kai savasis dažnis 35,4 kHz; c) kai savasis dažnis 48,8 kHz

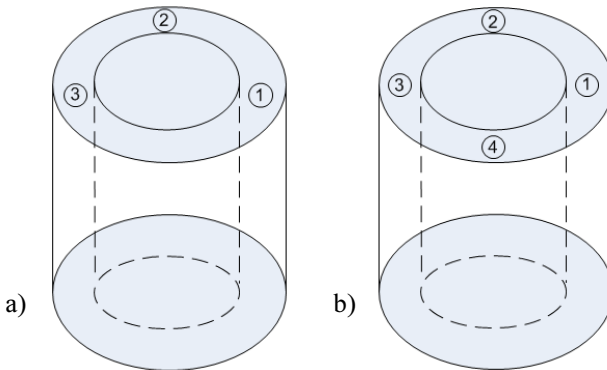
Fig. 4.8. Eigenforms of piezoceramic cylinders, when the running wave is achieved at harmonic excitation: a) when eigenfrequency 23.4 kHz; b) when eigenfrequency 35.4 kHz; c) when eigenfrequency 48.8 kHz

Pirmuoju atveju, kai pjezokeraminis cilindras buvo žadinamas pagal elektrodų išdėstymo schemą bėgančiai bangai simetriškai generuoti (4.2 pav., a), analizei pasirinktas 8–80 kHz žadinimo įtampos dažnio kitimo intervalas su 8 kHz dažnių kitimo žingsniu.

Antruoju atveju, kai pjezokeraminis cilindras buvo žadinamas pagal elektrodų išdėstymo schemą bėgančiai bangai asimetriškai generuoti (4.2 pav., b), analizei pasirinktas 5–55 kHz žadinimo įtampos dažnio kitimo intervalas su 5 kHz dažnių kitimo žingsniu.

Detalūs tyrimai buvo atliekami parinktiems kontaktiniams taškams, esantiems viršutinėje cilindro dalyje. Kai pjezokeraminis cilindras buvo

žadinamas pagal elektrodų išdėstymo schemą (4.2 pav., a) bėgančiai bangai simetriškai generuoti, detalesniam tyrimui buvo parinkti trys kontaktiniai taškai esantys ant elektrodų sekcijų susidūrimo. Tuo tarpu kai pjezokeraminis cilindras buvo žadinamas pagal elektrodų išdėstymo schemą (4.2 pav., b) bėgančiai bangai asimetriškai generuoti, detalesniam tyrimui buvo parinkti keturi kontaktiniai taškai esantys ant elektrodų sekcijų susidūrimo. Taškų išdėstymas pateikiamas 4.9 paveiksle.



4.9 pav. Pjezokeraminio cilindro viršutinėje dalyje parinkti kontaktiniai taškai detalesniam poslinkių ir jų krypčių tyrimui: a) kai pjezokeraminis cilindras buvo žadinamas pagal elektrodų išdėstymo schemą bėgančiai bangai simetriškai generuoti; b) kai pjezokeraminis cilindras buvo žadinamas pagal elektrodų išdėstymo schemą bėgančiai bangai asimetriškai generuoti

Fig. 4.9. The selected contact points at the upper part of the piezoceramic cylinder for detailed displacement and their movement investigation: a) when the piezoceramic cylinder was excited by the electrode arrangement diagram to generate the travelling wave symmetrically; b) when the piezoceramic cylinder was excited by the electrode arrangement diagram to generate the travelling wave asymmetrically

Šio tyrimo metu pjezokeraminių cilindrų elipsinių kontaktinių taškų judesio trajektorijų nustatymui buvo naudojama (2.34) formulė.

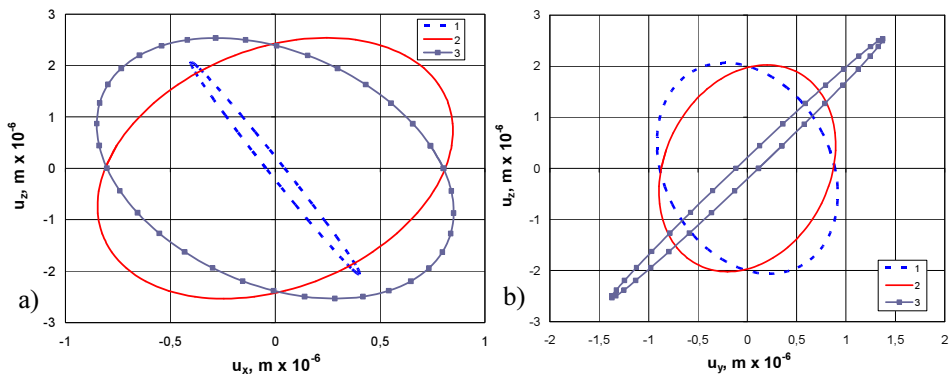
Analizuojant pjezokeraminių cilindrų, kurie buvo žadinami pagal pateiktas 4.2 paveiksle, a ir 4.2 paveiksle, b elektrodų konfigūracijas, įvertinus viršutinėje dalyje parinktų kontaktinių taškų (4.9 pav.) santykius tarp didžiosios ir mažosios elipsės ašies, buvo nustatyta, jog amplitudžių pikai buvo pasiekti rezonansiniame dažnyje. Taip pat buvo pastebėta, jog skirtingų taškų sukimosi kampas skirtingose vietose žymiai skiriasi rezonansiniame dažnyje, o tuo tarpu tolstant nuo rezonanso, visų pasirinktų taškų sukimosi kampas artėjo prie konkrečios reikšmės. Pagal tai buvo padarytos prielaidos, jog pjezokeraminių

cilindrų viršutinėje dalyje parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos artėjo prie rezonanso kreivės ir buvo pasiektas bėgančios bangos judėjimas.

Nagrinėjant viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų (4.9 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis, buvo pastebėta, jog prie skirtingų dažnių, judėjimo trajektorijų kryptys skiriasi. Todėl buvo padaryta dar viena prielaida, jog savieji dažniai gerai parinkti bėgančiai bangai gauti.

Elipsės, kurios buvo gautos prie 35,4 kHz savojo dažnio turėjo didesnę didžiąją ašį ir apėmė didesnę plotą negu prie 23,4 kHz ir 48,8 kHz. Pagal tai buvo nustatyta, jog prie 35,4 kHz viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų (4.9 pav.) judėjimas bus aktyvesnis, bei amplitudės pikas, atitinkamai, bus galingesnis, negu 23,4 kHz ir 48,8 kHz. Pagal elipsių sukimosi kampus buvo nustatyta, kuria kryptimi, pagal x , z ir y , z ašių koordinacių sistemą, judės kontaktiniai taškai.

Žemiau pateikti paveiksai vaizduoja viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų (4.9 pav., a) judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis prie 35,4 kHz savojo dažnio, kai cilindro aukštis h buvo 0,03 m (4.1 pav.). Pjezokeitiklio žadinimui buvo naudojama elektrodų schema, pateikta 4.2 paveiksle, a.



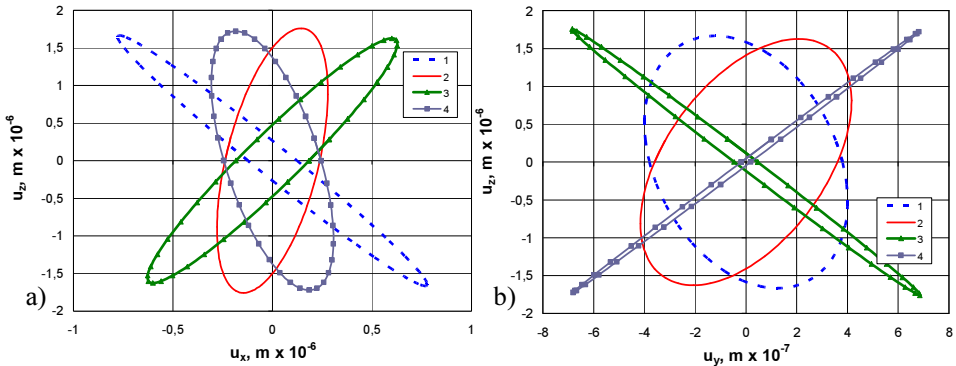
4.10 pav. Viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal x , z ir y , z ašis prie 35,4 kHz savojo dažnio: a) Viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal x , z ašis; b) Viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal y , z ašis

Fig. 4.10. Movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on x , z and y , z axes at 35.4 kHz eigenfrequency: a) Movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on x , z axes; b) Movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on y , z axes

Išnagrinėję viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų (4.9 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis, įvertinę jų didžiosios ir mažosios ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus prie skirtingų savųjų dažnių bei

žadinimo būdų, bėgančios bangos formavimui buvo pasirinktas modelis, kurio aukštis h (4.1 pav.) yra 0,03 m ir jis žadinamas asimetriškai 35,4 kHz dažniu pagal elektrodo schemą, pateiktą 4.2 paveiksle, b.

Žemiau pateikti paveikslai vaizduoja viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų (4.9 pav., b) judėjimo trajektorijas pagal x, z ir y, z ašis prie 35,4 kHz savojo dažnio, kai cilindro aukštis h buvo 0,03 m (4.1 pav.). Pjezokeitiklio žadinimui buvo naudojama elektrodo schema, pateikta 4.2 paveiksle, b.



4.11 pav. Viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal x, z ir y, z ašis prie 35,4 kHz savojo dažnio: a) Viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal x, z ašis; b) Viršutinėje cilindro dalyje parinktų taškų judėjimo trajektorijos pagal y, z ašis

Fig. 4.11. Movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on x, z and y, z axes at 35.4 kHz eigenfrequency: a) Movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on x, z axes; b) Movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on y, z axes

4.2. Aktyvių atramų modeliavimas

Šiame skyriuje buvo skaitiškai modeliuojama „V“ formos aktyvi atrama su trimis laisvės laipsniais. Žadinama aktyvi atrama užtikrindavo padėto į „V“ formos griovelius volo, sukimą ir judėjimą išilgai jo ašį.

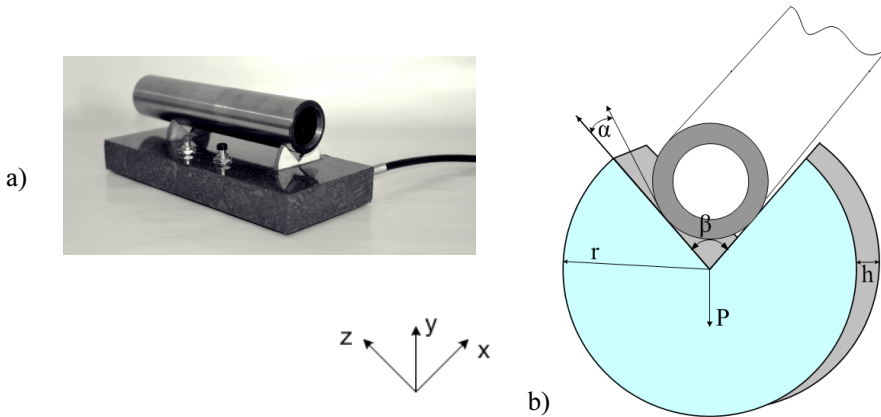
Tokio tipo aktyvios atramos dažniausiai naudojamos kaip atskiros sistemos stūmokliuose, hidraulinėse sistemose sklendėms užverti, staklėse.

Šiame tyrime buvo atsižvelgta į tai, jog aktyvi atrama bus naudojama kaip sudėtinė sistema, kuria būtų galima apjungti kelias sistemas į vieną, taip didinant laisvės laipsnių skaičių, kurie įgalintų išspręsti sudėtingesnius inžinerinius uždavinius.

Tyrimo rezultatuose pateikti nustatyti racionalūs geometriniai parametrai, aktyvios atramos savieji dažniai bei parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos.

Aktyvios atramos eksperimentinį modelį sudarė du diskai integruoti į stačiakampį pagrindą.

Bendra modelio schema pateikta 4.12 paveiksle, a. Modelio dalis, naudojama skaitiniams tyrimams, pateikta 4.12 paveiksle, b.



4.12 pav. Modelio schemas: a) Bendra aktyvaus guolio schema

(Bansevicius *et al.* 2013); b) Disko schema ir pradiniai geometriniai parametrai: $\{P\}$ – poliarizacijos vektoriaus kryptis, h – disko storis (0,003 m), r – disko spindulys (0,015 m), β – disko išpjovos kampas (90°), α – kampas tarp išpjovos sienelės ir volo

Fig. 4.12. Schemes of a model: a) the scheme of general active bearing; b) the scheme of disc and initial geometrical parameters: $\{P\}$ – the vector of polarisation, h – disc width (0.003 m), r – disk radius (0.015 m), β – angle of the disc groove (90°), α – angle between wall of groove and shaft

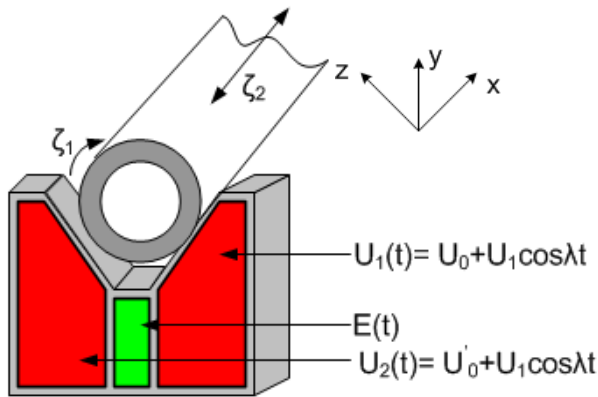
Modeliuojant aktyvią atramą diskams buvo nustatytos CTS-23 (<http://www.ferroperm-piezo.com>) pjezokeraminės medžiagos savybės. Stačiakampiam pagrindui buvo nustatytos vario medžiagos savybės.

Poliarizacijos vektorius buvo nukreiptas statmenai aktyvios atramos paviršiaus. Medžiagų CTS-23 ir vario detalios savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant aktyvią atramą, pateiktos 1 lentelėje A prieduose.

Šiame tyrime atrama buvo pagaminta iš aktyvios medžiagos: piezokeraminis diskas su padalytais elektrodais ir „V“ formos grioveliu.

Aukšto dažnio rezonansinių virpesių transformacija kontaktinėse srityse leido volui sukis (ζ_1) ir judėti palei ašį (ζ_2). Speciali volo padėtis mažų poslinkių srityje galėjo būti kontroliuojama variacija U_0 ir U'_0 (4.13 pav.), o judėjimas į priešingą pusę buvo realizuojamas sujungiant harmoninius signalus su atitinkamais keitiklio elektrodais.

Parinkant skirtingas elektrodo dalis ir analizuojant signalą $E(t)$, galima gauti kokioje padėtyje yra aktyvios atramos volas (4.13 pav.).



4.13 pav. Elektrodo išdėstymo schema
Fig. 4.13. The scheme of the electrodes placement

Pradiniame tyrimo etape buvo nustatyti racionalūs aktyvios atramos geometriniai parametrai, bei rasti išpjovos briaunoje esantys kontaktiniai taškai ant kurių būtų galima dėti volą, kad žadinama atrama užtikrintų jo sukimą (ζ_1) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2).

Norint užtikrinti aktyvios atramos efektyvumą, bei greitaveiką buvo stengiamasi gauti kuo didesnius savuosius dažnius, prie kurių išgautas išilginis judėjimas bei sukimas atitiktų keliamus techninius sistemos reikalavimus ir būtų racionalūs technologiniu požiūriu.

Kiekvienam nagrinėjamam modeliui buvo sprendžiamas savųjų reikšmių uždavinys, gauti savieji sistemos dažniai.

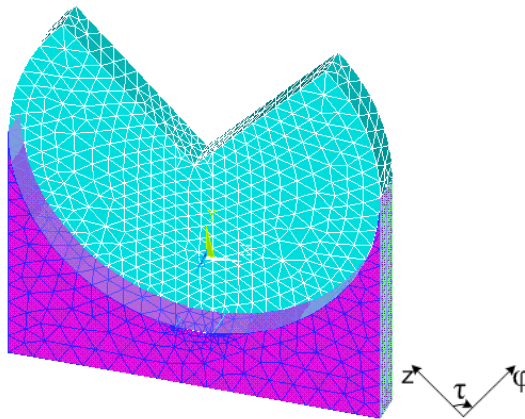
Savųjų formų atpažinimui buvo suskaičiuoti globaliniai dominavimo koeficientai. Žemiau pateikiama detalesnė analizė.

4.2.1. Aktyvių atramų savųjų reikšmių uždavinys

Sudarant aktyvios atramos baigtinių elementų modelį (BEM), buvo pasirinkti tokie baigtinių elementų tipai: SOLID 98, SOLID 186, SOLID 62 ir SOLID 95 (ANSYS programos žymėjimas). SOLID 98, SOLID 186, SOLID 62 elementai buvo naudojami pjezokeraminiam diskui modeliuoti, o SOLID 95 buvo naudojamas modelio pagrindu diskretizuoti.

Detalesnės šių baigtinių elementų tipų charakteristikos, dėl kurių buvo pasirinkti būtent šitie tipai, yra pateiktos A prieduose. Nagrinėjamo aktyvaus guolio apačia buvo standžiai įtvirtinta.

Aktyvios atramos, kurio modeliavimui buvo naudojami pradiniai geometriniai parametrai, baigtinių elementų modelis pateiktas 4.14 paveiksle.



4.14 pav. Aktyvios atramos BEM
Fig. 4.14. Active bearings of FEM

Norint nustatyti racionaliūs aktyvios atramos geometrinius parametrus, buvo detaliai išnagrinėta dvylika skaitinių modelių, kai buvo keičiami disko storis h , disko spindulys r , disko išpjovos kampas β (4.12 pav., b).

Disko storis buvo keičiamas režyje nuo 0,002 m iki 0,004 m, parenkant intervalą kas 0,0005 m.

Disko spindulys buvo keičiamas režyje nuo 0,01 m iki 0,02 m, parenkant intervalą kas 0,0025 m.

Disko išpjovos kampas buvo keičiamas režyje nuo 70° iki 100° , parenkant intervalą kas 10° .

Pjezokeraminio aktyvaus guolio savųjų reikšmių uždavinys buvo sprendžiamas naudojant Block Lanczos sprendiklį.

Kiekvienam aktyvios atramos baigtinių elementų modeliui suskaičiuota po 40 savųjų dažnių ir formų.

Sprendžiant aktyvių atramų savųjų reikšmių uždavinius, medžiagos slopinimas nebuvo vertinamas modeliuose. Medžiagos CTS-23 ir vario detalios savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant aktyvias atramas, pateiktos 1 lentelėje A prieduose.

Elektrodų konfiguracija, pagal kurią buvo atliekamas žadinimas, pateikta 4.14 paveiksle.

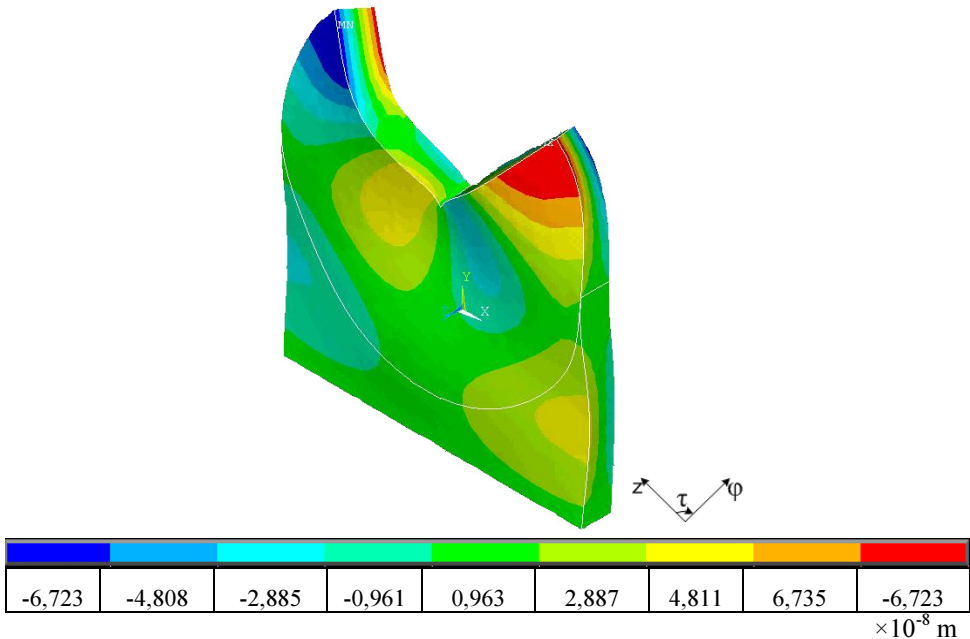
Šiame skyriuje tyrimų rezultatai pateikiami cilindrinėje koordinačių sistemoje, nes taip jie tiksliau nusako virpesių charakterį.

Normuotos pagal masių matricą virpesių amplitudės iš stačiakampės koordinačių sistemos pervedamos į cilindrinę, paketo ANSYS pagalba.

Tokia transformacija yra nesunkiai atliekama, kadangi skaičiavimų rezultatai saugomi lokalinėje elemento koordinatinių sistemoje.

Išsprendus savųjų reikšmių uždavinius, gautos aktyvių atramų savosios formos, kai buvo keičiami disko storis h , disko spindulys r , disko išpjovos kampas β (4.12 pav., b).

4.15 paveiksle pateikta viena iš aktyvios atramos savųjų formų, kai buvo keičiamas disko išpjovos kampas. Ji užtikrino volo sukimą (ζ_1) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2) prie 52,8 kHz savojo dažnio.

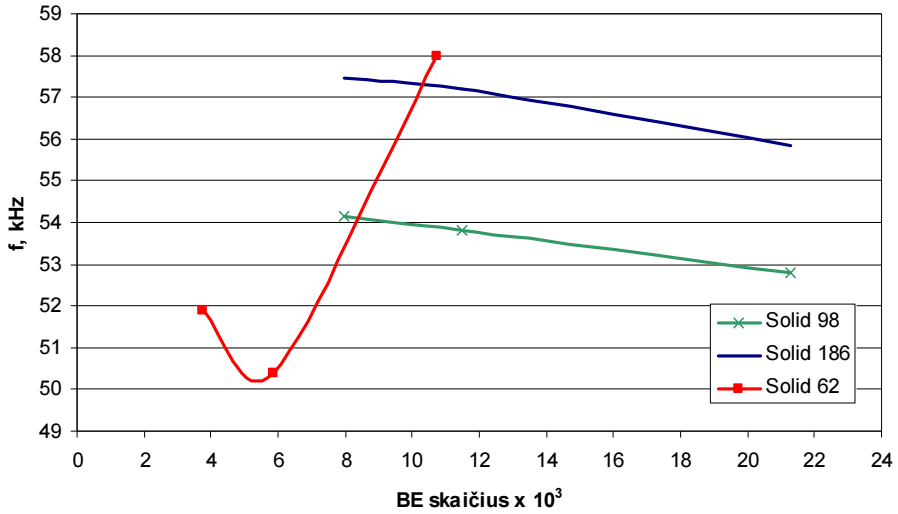


4.15 pav. Aktyvios atramos savoji forma prie 52,8 kHz savojo dažnio, kai disko išpjovos kampas $\beta = 90^\circ$

Fig. 4.15. The eigenform of the active bearing at 52.8 kHz eigenfrequency, when the angle of disc groove is $\beta = 90^\circ$

Norint ištirti skaitinių sprendinių tikslumą aktyvi atrama buvo modeliuojama prie skirtingų baigtinių elementų tipų bei tinklų.

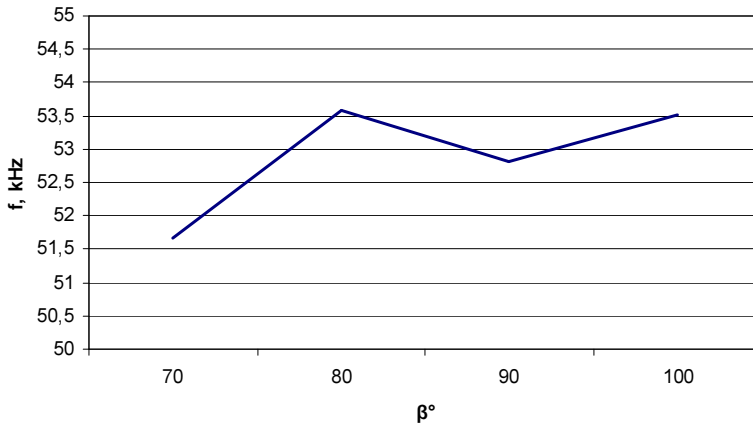
4.16 paveiksle pateiktos pasirinkto aktyvios atramos modelio, kai buvo keičiamas disko išpjovos kampas, savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų: SOLID 98, SOLID 186, SOLID 62, kurios gautos prie skirtingo baigtinių elementų skaičiaus (keičiant tinklo regionų sutankinimą).



4.16 pav. Aktyvios atramos savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir tinklų

Fig. 4.16. Dependencies of eigenfrequencies of active bearing on types and meshes of finite elements

4.17 paveiksle pateikiama diagrama vaizduojanti disko išpjovos kampo β (4.12 pav., b) įtaką aktyvios atramos saviesiems dažniams.

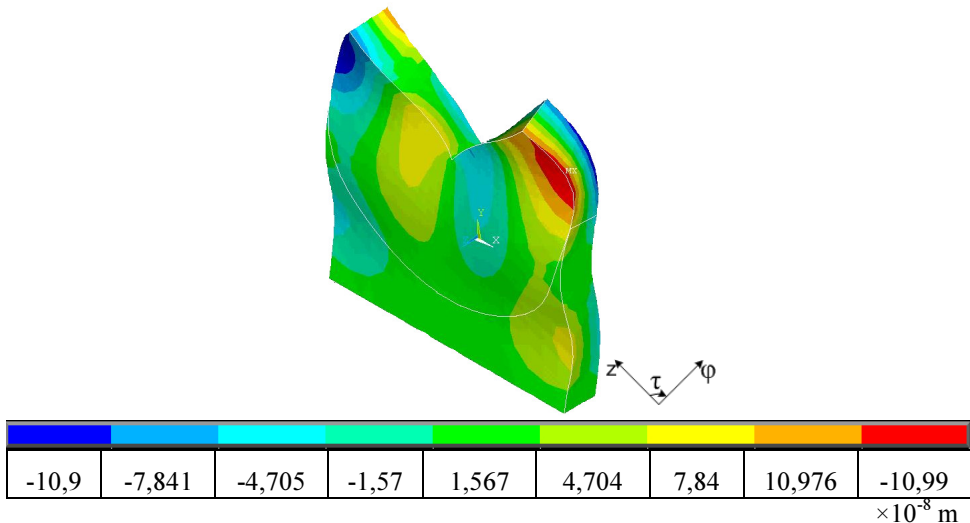


4.17 pav. Išpjovos kampo įtaka aktyvios atramos saviesiems dažniams

Fig. 4.17. The influence of angle of disc groove to eigenfrequencies of active bearing

Atliekant aktyvios atramos skaitinį modeliavimą, parinkinėjant skirtingus geometrinių matmenų santykius, buvo pastebėta, jog didinant disko išpjovos kampą β (4.12 pav., b) aktyvios atramos savasis dažnis kito neženkliai nuo 51,7 kHz iki 53,6 kHz. Dėl šios priklausomybės galima daryti prielaidą, jog disko išpjovos kampo pokyčiai intervale nuo 70° iki 100° neturėjo didelės įtakos savųjų formų vietos pasikeitimui jų eilėje.

4.18 paveiksle pateikta viena iš aktyvios atramos savųjų formų, kai buvo keičiamas disko spindulys. Ji užtikrino volo sukimą (ζ_1) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2) prie 108,6 kHz savojo dažnio.



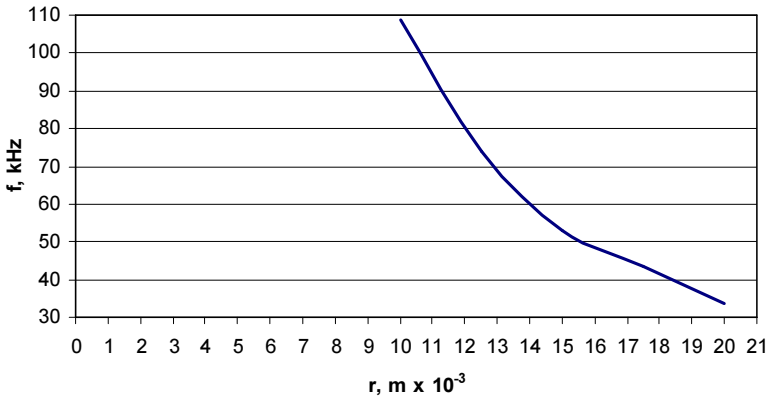
4.18 pav. Aktyvios atramos savoji forma prie 108,6 kHz savojo dažnio, kai disko spindulys r buvo 0,01 m

Fig. 4.18. The eigenform of active bearing at 108.6 kHz eigenfrequency, when the radius r of disc was 0.01 m

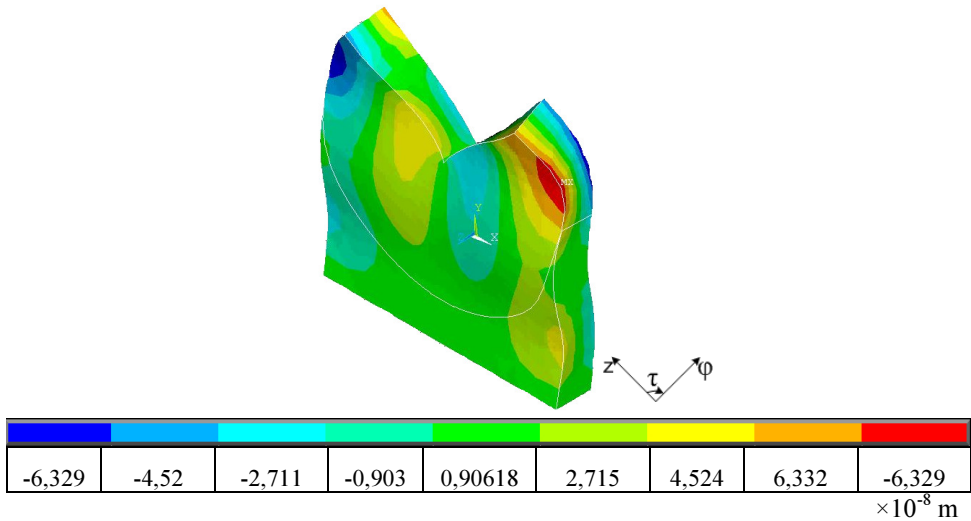
Atliekant aktyvios atramos skaitinį modeliavimą, parinkinėjant skirtingus geometrinių matmenų santykius, buvo pastebėta, jog didinant disko spindulį r (4.12 pav., b) aktyvios atramos savasis dažnis mažėjo nuo 108,6 kHz iki 33,7 kHz.

Dėl šios priklausomybės galima daryti prielaidą, jog kuo didesnis disko spindulys, tuo mažiau reikia žadinti aktyvią atramą, kad išgauti volo sukimą (ζ_1) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2).

4.19 paveiksle pateikiama diagrama vaizduojanti disko spindulio r (4.12 pav., b) įtaką aktyvios atramos saviesiems dažniams.



4.19 pav. Disko spindulio įtaka aktyvios atramos saviesiems dažniams
Fig. 4.19. The influence of disc radius to eigenfrequencies of active bearing

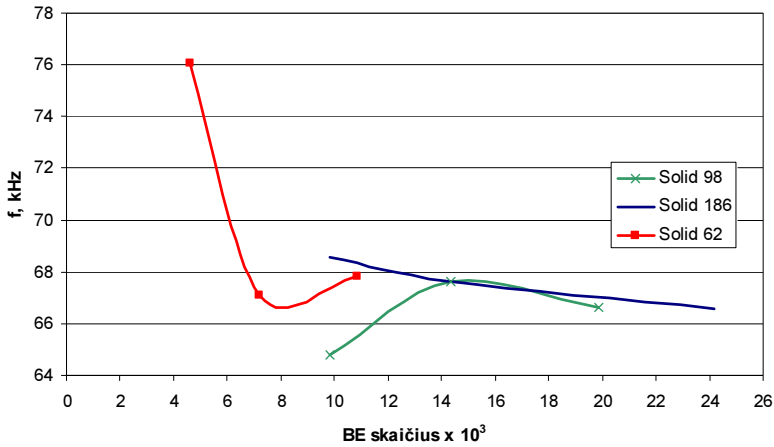


4.20 pav. Aktyvios atramos savoji forma prie 66,6 kHz savojo dažnio, kai disko storis h buvo 0,004 m

Fig. 4.20. The eigenform of active bearing at 66,6 kHz eigenfrequency, when the width h of disc was 0,004 m

4.20 paveiksle pateikta aktyvios atramos viena iš savųjų formų, kuri užtikrino volo sukimą (ζ_1) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2), kai buvo keičiamas disko storis. Aktyvios atramos savoji forma buvo pasiekta prie 66,6 kHz savojo dažnio, kai disko storis h (4.12 pav., b) buvo 0,004 m.

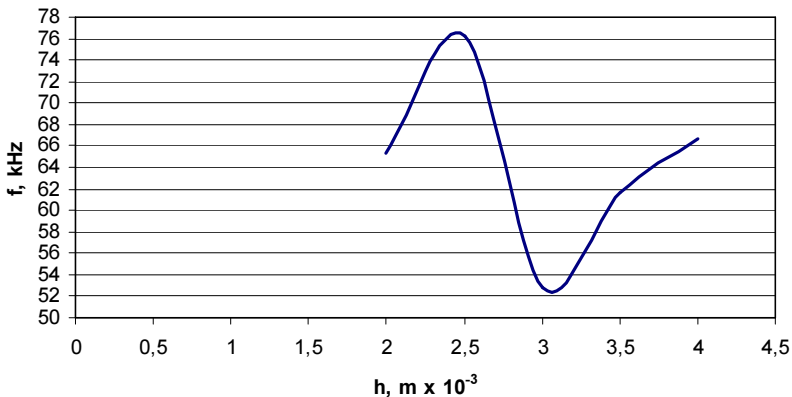
Žemiau paveiksle pateiktos pasirinkto aktyvios atramos modelio, kai buvo keičiamas disko storis, savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų: SOLID 98, SOLID 186, SOLID 62, kai buvo keičiamas tinklo regionų sutankinimas ir gautas skirtingas baigtinių elementų skaičius.



4.21 pav. Aktyvios atramos savųjų dažnių priklausomybės nuo baigtinių elementų tipų ir tinklų

Fig. 4.21. Dependencies of eigenfrequencies of active bearing on types and meshes of finite elements

4.22 paveiksle pateikiama diagrama vaizduojanti disko storio h (4.12 pav., b) įtaką, aktyvios atramos saviesiems dažniams.



4.22 pav. Disko storio įtaka aktyvios atramos saviesiems dažniams

Fig. 4.22. The influence of disc width to eigenfrequencies of active bearing

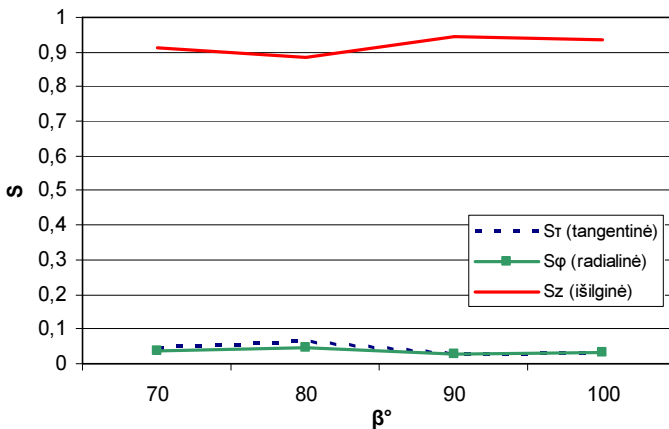
Atliekant aktyvios atramos modeliavimą, parinkinėjant skirtingus geometrinių matmenų santykius, buvo pastebėta, jog didinant disko storį h (4.12 pav., b) aktyvios atramos savasis dažnis kito neženkliai nuo 61,7 kHz iki 76,2 kHz.

Dėl šios priklausomybės galima daryti prielaidą, jog disko storio pokyčiai intervale nuo 0,002 m iki 0,004 m neturėjo didelės įtakos savųjų formų vietos pasikeitimui jų eilėje.

Aktyvios atramos modalinės analizės metu pastebėta, jog keičiant geometrinius parametrus, savosios formos išgaunamos vis prie kitų dažnių, t. y. pasikeičia savųjų formų vieta jų eilėje.

Dalinai problema buvo sprendžiama skaičiuojant dominavimo koeficientus, naudojant (2.31) ir (2.32) formules.

Gautų dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo disko išpjovos kampo β (4.12 pav., b), kai disko storio ir disko spindulio geometriniai parametrai nebuvo keičiami, pateikiamos 4.23 paveiksle.



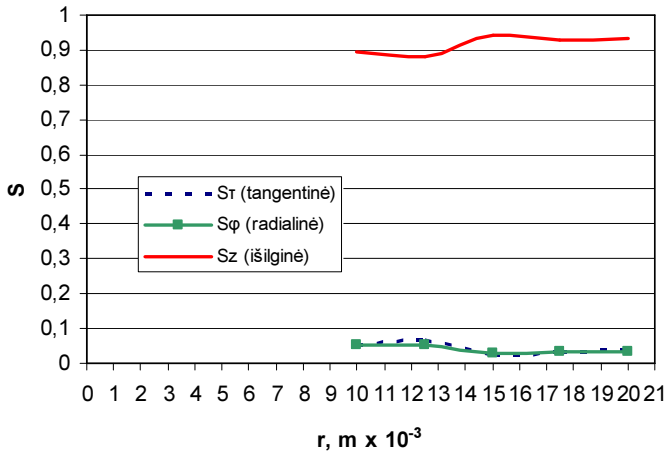
4.23 pav. Išpjovos kampo įtaka dominavimo koeficientams
Fig. 4.23. The influence of groove angle to domination coefficients

Pagal 4.23 paveiksle pateiktus rezultatus volo sukimui (ζ_1) buvo atrinktas aktyvios atramos modelis, kurio išpjovos kampas β (4.12 pav., b) yra lygus 90° , kuriame dominuoja išilginiai kontaktinių taškų, esančių disko išpjovos briaunos dalyje, poslinkiai.

Tačiau norint užtikrinti volo sukimą (ζ_1) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2), turi dominuoti radialiniai ir išilginiai kontaktinių taškų poslinkiai.

Atsižvelgiant į šiuos reikalavimus buvo atrinktas aktyvios atramos modelis, kurio išpjovos kampas β (4.12 pav., b) yra lygus 80° .

Gautų dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo disko spindulio r (4.12 pav., b), kai disko išpjovos kampo β ir disko storio h (4.12 pav., b) geometriniai parametrai nebuvo keičiami, pateikiamos 4.24 paveiksle.



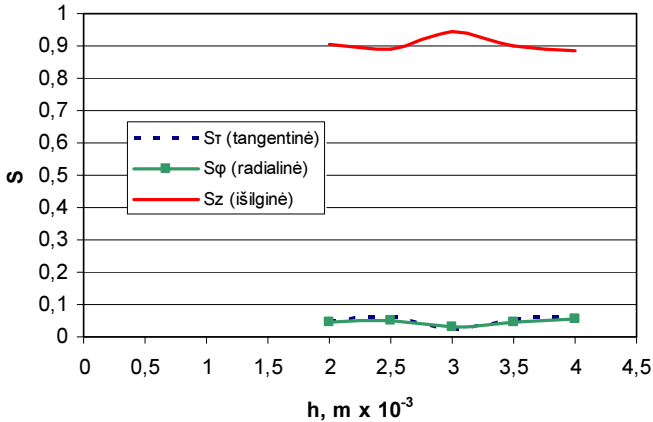
4.24 pav. Disko spindulio įtaka dominavimo koeficientams
Fig. 4.24. The influence of disc radius to domination coefficients

Iš pateiktų 4.24 paveiksle rezultatų matyti, jog volo sukimui (ζ_7) tinka aktyvios atramos modelis, kurio disko spindulys r (4.12 pav., b) yra lygus 0,015 m, kuriame dominuoja išilginiai kontaktinių taškų, esančių disko išpjovos briaunos dalyje, poslinkiai.

Tačiau su šiuo geometriniu dydžiu ($r = 0,015$ m) buvo atliekami kampo β tyrimai ir jų geometrinių parametru įtaka dominavimo koeficientams. Todėl buvo parinktas kitas tinkantis modelis, kurio disko spindulys r (4.12 pav., b) yra lygus 0,01 m. Šis modelis tinka, nes jame dominuoja radialiniai ir išilginiai kontaktinių taškų poslinkiai, kurie užtikrina volo sukimą (ζ_7) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2).

Gautų dominavimo koeficientų reikšmių priklausomybės nuo disko storio h (4.12 pav., b), kai disko išpjovos kampo ir disko spindulio (4.12 pav., b) geometriniai parametrai nebuvo keičiami, pateikiamos 4.25 paveiksle.

Pagal 4.25 paveiksle pateiktus rezultatus volo sukimui (ζ_7) buvo atrinktas aktyvios atramos modelis, kurio disko storis h (4.12 pav., b) yra lygus 0,004 m, kuriame dominuoja išilginiai kontaktinių taškų, esančių disko išpjovos briaunos dalyje, poslinkiai. Šis modelis pasirinktas, nes jame taip pat dominuoja radialiniai ir išilginiai kontaktinių taškų poslinkiai, kurie užtikrina volo sukimą (ζ_7) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2).



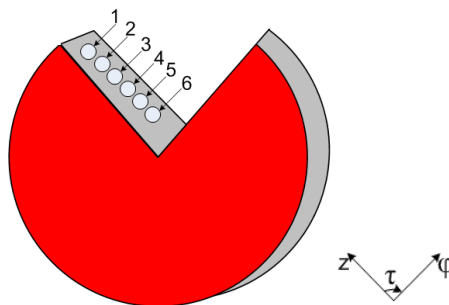
4.25 pav. Disko storio įtaka dominavimo koeficientams

Fig. 4.25. The influence of disc width to domination coefficients

Išanalizavus racionalių geometrinių parametru įtaką dominavimo koeficientams, bei saviesiems dažniams, remiantis gautais rezultatais, tolimesniems tyrimams atlikti buvo pasirinktas modelis, užtikrinantis volo sukimą, kurio išpjovos kampas β yra lygus 90° (4.15 pav.), o užtikrinantis judėjimą išilgai volo ašį – modelis su didžiausiu naudojamu tyrimuose storium, kurio h yra lygus $0,004$ m (4.20 pav.).

Sekantis modalinės dalies tyrimo tikslas buvo rasti išpjovos briaunos kontaktinius taškus ant kurių būtų galima dėti volą, kad žadinama atrama užtikrintų jo sukimą (ζ_1) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2).

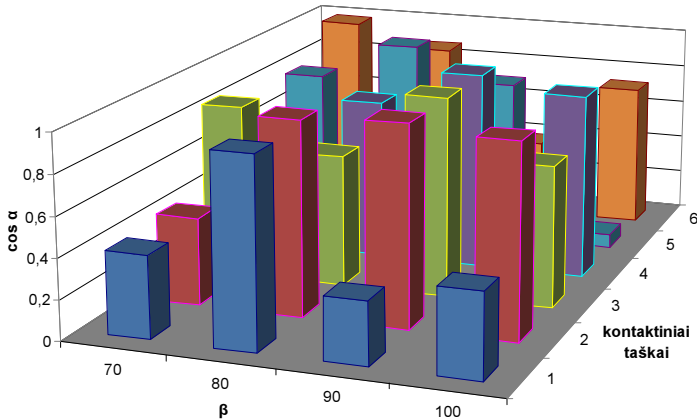
4.26 paveiksle pažymėti aktyvios atramos išpjovos briaunoje esantys kontaktiniai taškai, kurie buvo naudojami žemiau aprašytuose tyrimuose.



4.26 pav. Parinkti aktyvios atramos išpjovos briaunoje esantys kontaktiniai taškai, detalesniam poslinkių ir jų kryptių tyrimui

Fig. 4.26. The selected contact points of the wall groove for detailed displacement and their movement investigation

Rezultatai pateikti 4.27 paveiksle parodo, kurie aktyvios atramos išpjovos briaunoje esantys kontaktiniai taškai turi gerą kontaktą (kai kampas α pakankamai mažas; 4.12 pav., b) su vėlu ir yra rekomenduojami tolimesniems eksperimentiniams tyrimams atlikti.



4.27 pav. Kampas α , tarp disko išpjovos briaunoje esančių kontaktinių taškų ir vėlo, \cos reikšmės esant skirtingiems kampams β

Fig. 4.27. Cos values of angle α contact points between wall groove and shaft at different angles β

Iš 4.27 paveiksle pateiktų rezultatų matoma, jog aktyvios atramos išpjovos briaunoje esantys kontaktiniai taškai pažymėti numeriais 2, 3, 4 (4.26 pav.) turi gerą kontaktą su vėlu (nes kampas α pakankamai mažas; 4.12 pav., b), kai disko išpjovos kampas β (4.12 pav., b) yra lygus 90° ir kontaktiniame taške pažymėtame numeriu 5 (4.26 pav.), kai disko išpjovos kampas β (4.12 pav., b) yra lygus 80° .

4.2.2. Aktyvių atramų analizė esant harmoniniam žadinimui

Kitas žingsnis aktyvios atramos skaitinio modeliavimo procese buvo vėlo judėjimo analizės uždavinys esant harmoniniam žadinimui.

Šio uždavinio tikslas – nustatyti nanometrines skyros mikrorobotų aktyvių atramų rezonansinius dažnius, pasirinktame žadinimo dažnių spektre ir elipsinių kontaktinių taškų, su kuriais kontaktuoja vėlas, judesio trajektorijas.

Šiame tyrimų etape buvo nagrinėjamos žadinamos, pagal pateiktą 4.13 paveiksle elektrodų konfigūraciją, aktyvios atramos išpjovos briaunoje esančių kontaktinių taškų elipsinės judėjimo trajektorijos pagal y, z ašis,

įvertinant jų didžiosios ir mažosios ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus, buvo nustatytos didžiausios santykinės reikšmės. Taip pat buvo patikslinti rezonansiniai dažniai pasirinktame žadinimo dažnių spektre.

Šioje tyrimo dalyje medžiagos slopinimas buvo vertinamas modeliuose. Medžiagų CTS-23 ir vario detalios savybės, kurios buvo naudojamos modeliuojant aktyvias atramas, pateiktos 1 lentelėje A prieduose.

Šiame skyriuje tyrimų rezultatai pateikiami dekartio plokštumos koordinacinių sistemoje.

Šios dalies detalesniam tyrimui parinkti šeši kontaktiniai taškai, esantys ant disko išpjovos briaunos, pateikti 4.26 paveiksle. Aktyvių atramų elipsinių kontaktinių taškų judesio trajektorijų nustatymui buvo naudojama (2.34) formulė.

Analizuojant aktyvias atramas, kurios buvo žadinamos, pagal pateiktą 4.13 paveiksle elektrodų konfigūraciją, įvertinus aktyvios atramos išpjovos briaunoje esančių kontaktinių taškų (4.26 pav.) santykius, tarp didžiosios ir mažosios elipsės ašies, buvo nustatyta, jog amplitudžių pikai buvo pasiekti rezonansiniame dažnyje.

Analizės metu pastebėta, jog skirtingų taškų sukimosi kampas skirtingose vietose žymiai skiriasi rezonansiniame dažnyje, o tuo tarpu tolstant nuo rezonanso, visų pasirinktų taškų sukimosi kampas artėjo prie konkrečios reikšmės. Pagal tai buvo padarytos prielaidos, jog aktyvios atramos išpjovos briaunoje esančių kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos artėjo prie rezonanso kreivės ir buvo pasiektas volo sukimas (ζ_1) ir judėjimas išilgai jo ašį (ζ_2).

Nagrinėjant aktyvios atramos išpjovos briaunoje esančių kontaktinių taškų (4.26 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x, z ir y, z ašis, buvo pastebėta, jog prie skirtingų dažnių judėjimo trajektorijų kryptys skiriasi.

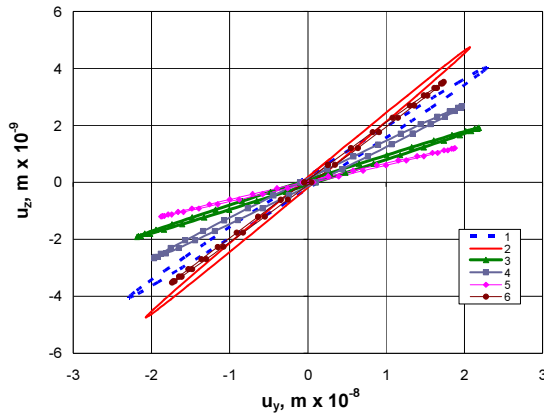
Todėl buvo padaryta dar viena prielaida, jog savieji dažniai gerai parinkti volo sukimui (ζ_1) ir judėjimui išilgai jo ašį (ζ_2) gauti.

Taip pat pastebėta, jog kontaktinių taškų, kurių elipsės turi didesnę didžiąją ašį ir apima didesnį plotą, judėjimas buvo aktyvesnis, bei amplitudės pikas, atitinkamai, buvo galingesnis.

Pagal elipsių sukimosi kampus buvo nustatyta, kuria kryptimi, pagal y, z ašių kordinačių sistemą, judės kontaktiniai taškai ir ar jie užtikrins volo sukimą (ζ_1) ir judėjimą išilgai jo ašį (ζ_2).

Analizuojant kontaktinių taškų elipsių judėjimą užtikrinantį volo sukimą, elipsės, kurios buvo gautos prie 52,8 kHz savojo dažnio, turėjo didesnę didžiąją ašį ir apėmė didesnį plotą negu prie 53,6 kHz, 108,6 kHz, 66,6 kHz.

4.28 paveikslas vaizduoja aktyvios atramos išpjovos briaunoje esančių kontaktinių taškų (4.26 pav.) judėjimo trajektorijas pagal y, z ašis prie 52,8 kHz savojo dažnio, kai išpjovos kampas β (4.12 pav., b) buvo 90° .

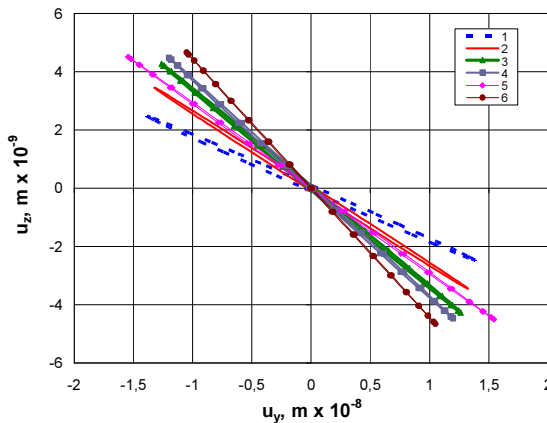


4.28 pav. Disko išpjovos sienelės dalyje parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos pagal y , z ašis, kai savasis dažnis 52,8 kHz

Fig. 4.28. Movement trajectories of the selected contact points of wall groove on y , z axes at 52.8 kHz eigenfrequency

Analizuojant kontaktinių taškų elipsių judėjimą užtikrinanti judėjimą išilgai volo ašį, elipsės, kurios buvo gautos prie 66,6 kHz savojo dažnio, turėjo didesnę didžiąją ašį ir apėmė didesnę plotą negu prie 52,8 kHz, 53,6 kHz, 108,6 kHz.

Žemiau pateiktas 4.29 paveikslas vaizduoja aktyvios atramos išpjovos briaunoje esančių kontaktinių taškų (4.26 pav.) judėjimo trajektorijas pagal y , z ašis prie 66,6 kHz savojo dažnio, kai disko storis h (4.12 pav., b) buvo 0,004 m.



4.29 pav. Disko išpjovos sienelės dalyje parinktų kontaktinių taškų judėjimo trajektorijos pagal y , z ašis, kai savasis dažnis 66,6 kHz

Fig. 4.29. Movement trajectories of the selected contact points of wall groove on y , z axes at 66.6 kHz eigenfrequency

Išanalizavus elipsių trajektorijų reikšmes pagal y ašį disko išpjovos sienelės dalyje 1-ajame, 2-ajame ir 3-ajame kontaktiniuose taškuose (4.26 pav.) gautos didžiausios santykinės reikšmės.

Įvertinus kontaktiniuose taškuose gautas didžiausias santykinės reikšmes ir atsižvelgiant į 4.27 paveiksle pateiktus rezultatus nustatyta, jog aktyvios atramos išpjovos briaunoje esantys kontaktiniai taškai pažymėti numeriais 2, 3 (4.26 pav.) turi geresnį kontaktą su volu negu kiti tiriami kontaktiniai taškai ir užtikrina volo sukimą, bei judėjimą išilgai volo ašį.

Išnagrinėjus aktyvių atramų išpjovos briaunoje esančių kontaktinių taškų (4.26 pav.) elipsines judėjimo trajektorijas pagal x , z ir y , z ašis, įvertinus jų didžiosios ir mažosios ašies santykinius dydžius, bei sukimosi kampus prie skirtingų savųjų dažnių, patvirtinti gauti rezultatai modalinėje dalyje. Volo sukimui buvo pasirinktas skaitinis modelis, kurio išpjovos kampas β yra lygus 90° (4.15 pav.) ir yra žadinamas 52,8 kHz dažniu, o užtikrinantis judėjimą išilgai volo ašį – modelis, kurio h yra lygus 0,004 m (4.20 pav.) ir žadinamas 66,6 kHz dažniu.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Patvirtinta, jog racionalių geometrinių parametrų ir kontaktinių taškų judėjimo trajektorijų nustatymo metodika leido sukurti ne tik plokštuminių, bet ir erdviųjų nanometrines skyros mikrorobotų cilindro formos pjezokeitiklių bei aktyvių atramų originalius skaitinio uždavinio sprendimo algoritmus.
2. Baigtinių elementų tinklo generavimas leido automatizuotai nagrinėti erdvinis nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių skaitinius modelius su skirtingais tinklo tankiais, ko pasekoje užsibrėžtas tikslumas buvo pasiektas per trumpesnę laiką.

Bendrosios išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros apžvalgą nustatyta, jog plokštuminių ir erdvinių nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių, kurie yra taikomi kompleksinėse sistemose, skaitiniai modeliai yra sudėtingi, imlūs skaičiavimo resursams, be to mažai automatizuoti sprendžiant parametrizuotus uždavinius.
2. Skaitinių tyrimų metu nustatyta, jog baigtinių elementų metodas yra efektyvus skaitinis metodas sprendžiant daugiafizinio (angl. *multiphysics*) tipo uždavinius ir sudėtingą netiesinę geometriją turinčius uždavinius.
3. Racionalių geometrinių parametrų nustatymo metodika apėmė originalaus uždavinio sprendimo algoritmo sukūrimą, sprendimo metodų parinkimą, tikslo funkcijos bei apribojimų nustatymą. Tokio išspręsto uždavinio rezultatai susiaurino geometrinių parametrų paieškos sritį. Vėliau apjungiant uždavinio dedamųjų dalių tyrimų rezultatus, buvo suformuotas galutinis rezultatas. Toks algoritmas yra priimtinas bei gali būti panaudotas nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių geometrinių parametrų nustatymui.
4. Darbe pasiūlytas skaitinio modeliavimo priemonių automatizavimo metodas, kuris supaprastino nanometrines skyros mikrorobotų pjezokeitiklių tyrimo procesą. Sukurtas ANSYS komandų skriptų

generatorius įgalino lengvai keisti skaitinio modelio geometrinius parametrus, parinkti skirtingas baigtinių elementų savybes ir taip greičiau gauti galutinius rezultatus. Nanometrines skyras mikrorobotų pjezokeitklių sistemos skaitinio modeliavimo rezultatų apdorojimas duomenų bazėje, eliminuojant rankinį darbą, sutaupė trečdalį darbo laiko.

Literatūra ir šaltiniai

Allik, H.; Hugdes, T. 1970. Finite element method for piezoelectric vibrations, *International Journal for Numeric Methods in Engineering* 2(2): 151–157.

ANSYS 10.0. 2009. *Theory reference, elements reference, commands reference*. Swanson analysis system IP Inc. [žiūrėta 2010 m. spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: www.ansys.stuba.sk

APC International APC International [žiūrėta 2013 m. rugšėjo 5 d.]. Prieiga per internetą: www.americanpiezo.com

Atkočiūnas, J.; Merkevičiūtė, D. 2004. Optimal shakedown design for bar systems: strength, stiffness and stability constraints, in *Proceedings of the Seventh International Conference on Computational Structures Technology*, 7–9 September, 2004, Lisbon, Portugal. Stirling: Civil-Comp Press, 361–362.

Atkočiūnas, J.; Nagevičius, J. 2004. Tamprumo teorijos pagrindai: *vadovėlis*. Vilnius: Technika. 528 p.

Atkočiūnas, J.; Jarmolajeva, E.; Merkevičiūtė, D. 2004. Optimal shakedown loading for circular plates, *Structural and Multidisciplinary Optimization, International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization (ISSMO)* 27(3): 178–188.

Avitabile, P. 2008. Modal space back to basics, *Experimental Techniques*. January–February, 11–12.

Babuška, I.; Szabo, B. A.; Katz, I. N. 1981. The p -version of the Finite Element Method, *SIAM Journal on Numerical Analysis* 18(3): 515–545.

Badel, A.; Sebald, G.; Guyomar, D.; Lallart, M.; Lefeuvrel, E.; Richard, C.; Qiu, J. 2006. Piezoelectric vibration control by synchronized switching on adaptive voltage sources: Towards wideband semi-active damping, *J. Acoust. Soc. Am.* 119(5): 2815–2825.

Bansevičius, R. 2007. Mechatroninių nanometrų skyros daugiamačių poslinkių generavimo/matavimo sistemų kūrimas ir tyrimas, *Aukštųjų technologijų programos Nr. B-07017 ataskaita*. Kauno technologijos universitetas. 226 p.

Bansevičius, R.; Taločka, T.; Knight, A. 1995. Intelligent mechanisms in mechatronics: parameters, design, application, in *Proceedings of the Fifth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, 520–525.

Barauskas, R. 1992. Dynamic analysis and synthesis of elastic structures with unilateral constraints, *Computer methods and application to controlled vibrational systems*. Kaunas: Technologija. 291 p.

Barauskas, R. 1998. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Kaunas: Technologija. 375 p.

Barauskas, R.; Ostasevičius, V. 1998. *Tampriųjų vibrosmūginių sistemų analizė ir optimizavimas. Kompiuteriniai metodai ir jų taikymas*. Kaunas: Technologija. 213 p.

Barauskas, R.; Kačianauskas, R.; Belevičius, R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius: Technika. 612 p.

Barauskas, R.; Kuprys M.; Leonavičiūtė, U. 2003. Object-oriented implementation of transient wave propagation finite element models, *Informacines technologijos ir valdymas* 4(29): 30–38. Kauno technologijos universitetas.

Bareikis, R. 2002. *Svyruojančio strypo ultragarsinių virpesių sistemų tyrimas: daktaro disertacija*, Vilniaus pedagoginis universitetas.

Bathe, K. J. 1978. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 528 p.

Bathe, K. 1982. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 406 p.

Bathe, K.; Wilson, E. 1976. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 578 p.

Baušys, R.; Wiberg, N. E. 1999. Adaptive finite element strategy for acoustic problems, *Journal of Sound and Vibration* 226(5): 79–89.

Belhachmi, Z.; Sac-Epée, J. M.; Sokolowski, J. 2005. Mixed Finite Element Methods for Smooth Domain Formulation of Crack Problems, *SIAM Journal on Numerical Analysis* 43(3): 1295–1320.

Bubulis, A. 2002. *Preciziniai vibraciniai įrenginiai skysčiams ir birioms medžiagoms dozuoti: monografijos santrauka*. Kaunas: Technologija. 61 p.

Cook, R. 2001. *Concept and Applications of Finite Elements Analysis*. 4th edition. New York: John Wiley & Sons Inc. 784 p.

- Daugėla, A.; Fujii, H.; Jeronimo, C.; Misaki, A. 1995. Piezo ceramic based locomotive drive, in *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machines and Human Science MHS'95*. October 4–6, 1995, Nagoya, 187–192.
- Desai, C. S.; Abel, F. J. 1972. Introduction to the finite element method, *Van Nostrand Reinhold Company*. New York, USA. 224 p.
- Dobrowolski, M.; Villegas, M. 2005 A Stabilized Mixed Finite Element Method for Elliptic Systems of First Order, *SIAM Journal on Numerical Analysis* 43(3): 949–969.
- Drukeitinienė, A. 2011. *Nanometrų skyros judančių daugiamachių pjezrobotų trajektorijų formavimas*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Ferroperm piezoceramics A/S [žiūrėta 2013 m. rugsėjo 3 d.]. Prieiga per internetą: www.ferroperm-piezo.com
- Hesselbach, J.; Plitea, N.; Thoben, R. 1997. Advanced Technologies for Micro Assembly, in *Proceedings of SPIE Conference on microrobotics and microsystem fabrication*. Pennsylvania, 178–190.
- Hinton, E.; Owen, D. J. R. 1979. An introduction to finite element computations, *Pineridge Press Limited*. Swansea, United Kingdom. 385 p.
- Hirata, H.; Ueha, S. 1993. Characteristics estimation of a travelling wave type ultrasonic motor, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 40(4): 402–406.
- Irons, B.; Ahmad, S. 1980. *Techniques of finite elements*. Ellis Horwood, Chichester, United Kingdom. 253 p.
- Kačianauskas, R.; Markauskas, D. 2004. Moving Locally Predefined Remeshing for Deep Cone, *Informatikos ir informatikos institutas, Informatika* 15(4): 489–514. ISSN 0868-4952
- Kardestuncer, H.; Norie, D. H. 1987. *The Finite Element Handbook*. New-York: McGraw-Hill. 1381 p.
- Kenji, U. 1997. *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors*. Kluwer Academic Publishers, London. 343 p.
- Koc, B.; Cagatay, S.; Uchino, K. 2002. A piezoelectric motor using two orthogonal bending modes of a hollow cylinder, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control* 49(4): 495–500.
- Kulvietis, G.; Daugėla, A. 1995. Intelligent transducers for materials physical properties measurement, *Mechatronics – the Integration of Engineering Design*. London: MEP, 91–94.
- Lee, C. K.; Hoobs, R. E. 1999. Automatic adaptive finite element mesh generation over arbitrary twodimensional domain using advancing front technique, *Computers & Structures* 71: 9–34.

Lewandowski, R. 1997. Computational Formulation for Periodic Vibration of Geometrically Nonlinear Structures, *Int. J. Solids Structures* 34(15), Part 1: 1925–1947, Part 2: 1949–1964.

Li, H.; Chen, Z. B.; Tzou, H. S. 1998. Torsion and transverse sensing of conical shells, *Journal Mechanical Systems and Signal Processing* 24(7): 2235–2249.

Li, H.; Chen, Z. B.; Tzou, H. S. 2010. Distributed actuation characteristics of clamped-free conical shells using diagonal piezoelectric actuators, *Journal Smart Materials & Structures, SMART MATER STRUCT* 19(11): 15–24.

Lietuvos mokslas. *Virpesių mechanika ir technika*. Vilnius: Lietuvos mokslas. 568 p.

Lučinskis, R. 2014. *Pjezoelektrinių keitiklių su įvairiakrypčiais poliarizavimo vektoriais virpesių tyrimas*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Hemsel, T.; Bansevicius, R. 2010. The experimental research of piezoelectric actuator with two vectors of polarization direction, *Mechanika* 2(82): 50–57. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1207.

Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Bansevicius, R. 2013. Investigation of oscillations of the piezoelectric actuator with two-directional polarization, *Mechatronic Systems and Materials IV Solid State Phenomena 4*: 328–333. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. ISSN 1012-0394 (ISI Web of Science).

Marqui, C. De.; Erturk, Jr.; A & Inman, D. 2009. An electromechanical finite element model for piezoelectric energy harvester plates, *Journal of Sound and Vibration* 327: 9–25

Matsuoka, T.; Okamoto, H.; Asano, M.; Mitsuishi, S.; Matsui, T. 1994. A prototype Model of micro mobile machine with piezoelectric driving force actuator, in *Proceedings of the Fifth International Symposium on Micro Machines and Human Science MHS'94*. October 4–6, 1994, Nagoya, 101–104.

Mažeika, D. 1999. *Daugiamųjų pjezokeitiklių geometrijos ir elektrodų konfigūracijos optimizavimas*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Medical Design [žiūrėta 2011 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: www.medicaldesign.com/mag/need_small_motor_0908/

Narvydas, G., Simutis, R. 2007. Autonominių mobiliųjų robotų judėjimo valdymas, iš *Informacinės technologijos 2007*, konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 467–470.

Noliac A/S [žiūrėta 2013 m. rugsėjo 15 d.]. Prieiga per internetą: www.noliac.com

Ostaševičius, V.; Bagdonas, V.; Tamulevičius, S.; Grigaliūnas, V. 2006. Analysis of a Microelectrostatic Motor Solid State Phenomena, *Mechatronic Systems and Materials* 113(7): 185–189.

Park, T.; Jeong, S.; Chong, H.; Uchino, K. 2010. Design of thin cross type ultrasonic motor, *Journal of Electroceramics* 24(4): 288–293.

Penetration FE Analysis, *Informatica* 15(4): 489–514.

- Qiu, J.; Ji, H. 2010. The application of piezoelectric materials in smart structures in China Authors, *2010 International Journal of Aeronautical and Space Science* 11(4): 266–284.
- Qiu, J.; Tani, J.; Takagi, T. 1994. Intelligent cylindrical shells without vibration, in *Proceedings of the Fifth International Symposium on Micro Machines and Human science MHS'94*. October 4–6, 1994, Nagoya, 123–130.
- Ragulskis, K.; Bansevicius, R.; Barauskas, R.; Kulvietis, G. 1988. *Vibromotors for precision microrobots*. New York: Hemisphere Publishing. 310 p.
- Shi, G.; Atluri, S. N. 1990. Active control of nonlinear dynamic response of space-frames using piezo-electric actuators, *Journal Computers & Structures* 115: 549–564.
- Simutis, R.; Narvydas, G. 2008. Autonomous mobile robot control using IF–THEN rules and genetic algorithm, *Information technology and control* 37(3): 193–197.
- Stupak, E.; Baušys, R. 2000. Nestruktūrinių BE tinklų generavimas sudėtingiems dvimačiams objektams, *Statyba* 6(1): 17–24.
- Stupak, E.; Kačianauskas, R. 2000. Adaptyviųjų baigtinių elementų tinklų taikymas įtempimų būviui nustatyti ties koncentratoriais, *Mechanika* 4(24): 31–35.
- Tainhong, I.; Liding, W.; Qiongying, L.; Xiaodong, T. 1994. Theoretical analysis and design of ultrasonic micromotors, in *Proceedings of the Fifth International Symposium on Micro Machines and Human Science MHS'94*. October 4–6, Nagoya, 115–119.
- Toshiiku, S. 1993. *An introduction to ultrasonic motors*. Oxford Clarendon Press. 256 p.
- Tsuruta, K.; Mikuriya, Y.; Ishikawa, Y. 1999. Micro sensor developments in Japan, *Sensor Review* 19(1): 37–42.
- Tumasonienė, I. 2009. *Precizinių mikrorobotų pjezokeitiklių savųjų formų atpažinimo problema: daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Tumasonienė, I.; Kulvietis, G. 2005. FEM application for eigenfrequencies analysis of piezoceramic actuators, *Informacinės technologijos 2005: aktualijos ir perspektyvos*, Alytus, 171–174.
- Turner, M. J.; Clough, R. W.; Martin, H.; Topp, L. J. 1956. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, *J. Aero. Sci.* 13: 805–823.
- Tzou, H. S. 1993. *Piezoelectric shells (Distributed sensing and control of continua)*. Kluwer Academic Publishers. 320 p.
- Uchino, K. 1997. *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors*. Kluwer Academic Publishers. 349 p.
- Uchino, K. 2010. *Ferroelectric Devices*, 2nd edition. New York: CRC/Dekker. 78 p.

Uchino, K.; Giniewicz, J. 2003. *Micromechatronics*. New York: Marcel Dekker Inc. 504 p.

Uchino, K., Ohnishi, K. 1989. *Linear motor*. USA. Patento Nr.: 4857791.

Vasiljev, P.; Mažeika, D.; Kulvietis, G. 2007. Modelling and Analysis of Omni-directional Piezoelectric Actuator, *Journal of Sound and Vibration* 308(3–5): 867–878.

Vasiljev, P.; Tiškevičius, J.; Mažeika, D.; Kulvietis, G. 2003. Piezoelectric Actuator for Body Positioning in the Plane, *Mechanika* 5(43): 39–43.

Wang, S.; Wang, X.; Loughlan, J. 2004. Active Control of Transient Vibration of Thin-Walled Composite Beams, *World Journal of Engineering* 1: 1–17. ISSN: 1708-5284.

Wang, X. J.; Yue, H. H.; Jiang, J.; Deng, Z. Q.; Tzou, H. S. 2011. Wireless Active Vibration Control of Thin Cylindrical Shells Laminated with Photostrictive Actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 22(4): 337–351.

Zienkiewicz, C. O.; Taylor, R. L. 1967. *The finite element method in structural and continuum mechanics*, 1st edition. McGraw Hill, London, 619–648.

Žiliukas, P.; Barauskas, R. 1997. *Mechaniniai virpesiai*. Kaunas: Technologija. 345p.

Бансјавичюс, Р.; Иванов, А.; Камышный, Н. и др. 1985. *Промышленные роботы для миниатюрных изделий*. Москва: Машиностроение. 263 с.

Бансјавичюс, Р.; Рагульскис, К. 1981. *Вибродвигатели*. Вильнюс: Мокслас. 193 с.

Бараускас, Р.; Кульветис, Г.; Рагульскис, К. 1984. *Расчет и проектирование вибродвигателей*. Ленинград: Машиностроение. 99 с.

Васильев, П. Е.; Зубас, А. И. 1975. *Вибродвигатель*. Патент Nr.: 581756.

Болотин, В. В. 1978. *Вибрации в технике*. Т. 1. Москва: Машиностроение. 352 с.

Голямина, И. П. 1979. *Ультразвук – маленькая энциклопедия*. Москва. 89 с.

Джагупов, Р.; Ерофеев, А. 1986. *Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике*. Ленинград: Машиностроение. 252 с.

Зенкевич, О. 1975. *Метод конечных элементов в технике*. Москва: Мир. 541 с.

Каплун, А. Б.; Морозов, Е. М.; Олферьева, М. А. 2007. *Ansys в руках инженера*. Изд. 2. Эдиториал УРСС. 269 с.

Кульветене, Р.; Кульветис, Г. 1989. *Аналитические вычисления на мини-ЭВМ*. Вильнюс. 84 с.

Лавриненко, В. В. 1968. Пьезоэлектрический двигатель. Патент Nr.: 217509.

Мэзон, У. 1969. *Применение физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела*. Т. 4. Москва: Мир. 420 с.

- Плужников, В.; Семенов, В. 1971. *Пьезокерамические твердые схемы*. Москва: Энергия. 168 с.
- Смажевская, Е.; Фельдман, Н. 1971. *Пьезоэлектрическая керамика*. Москва: Советское радио. 200 с.
- Пановко, Я. 1990. *Основы прикладной теории колебаний и удара*. Ленинград: Политехника. 297 с.
- Тимошенко, С. П.; Янг, Д.; Уивер, У. 1985. *Колебания в инженерном деле*. Москва: Машиностроение. 472 с.
- Теребушко, О. И. 1984. *Основы теории упругости и пластичности*. Москва: Наука. 319 с.
- Филипов, А. 1970. *Колебания деформируемых систем*. Москва: Машиностроение. 733 с.
- Чигарев, А. В.; Кравчук, А. С., Смалюк, А. Ф. 2004. *ANSYS для инженеров*. Ленинград: Машиностроение. 511 с.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Kulvietis, G.; Tumasonienė, I.; Bansevicius, R.; Grigoravicius, A.; Jūrėnas, V.; Navickaitė, S. 2010. Geometry optimization of piezoceramic laser shutter, *International Journal of Mechanics North Atlantic University Union* 4(3): 63–70. ISSN 1998-4448.

Bansevicius, R.; Kulvietis, G.; Mažeika, D.; Drukteinienė, A.; Grigoravicius, A. 2012. Cylindrical piezoelectric mobile actuator based on travelling wave, *Mechanika* 18(5): 554–560. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1207 (ISI Web of Science).

Bansevicius, R.; Kulvietis, G.; Jegorenka, J.; Grigoravicius, A. 2013. Research and Development of Piezoelectric Active Supports for Precise Shafts, *Journal of vibroengineering* 15(2): 1059–1063. Vilnius: Vibromechanika. ISSN 1392-8716 (ISI Web of Science).

Baurienė, G.; Mamčenko, J.; Kulvietis, G.; Grigoravicius, A.; Tumasonienė, I. 2013 The ring type piezoelectric actuator generating elliptical movement, *Mechanika* 19(6): 688–693. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1207 (ISI Web of Science).

Baurienė, G.; Kulvietis, G.; Grigoravicius, A. 2014 Optimization of fixation elements parameters for ring type piezoelectric actuator generating elliptical movement, *Mechanika* 20(3): 294–298. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1207 (ISI Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

Kulvietis, G.; Tumasonienė, I.; Bansevicius, R.; Grigoravičius, A.; Jūrėnas, V.; Navickaitė, S. 2010. Determining geometrical parameters at laser shutter, in *Proceedings of the International Conference on Applied Computer Science (ACS)*, September 15–17, 2010, Malta. Institute for Environment, Engineering, Economics and Applied Mathematics Malta. WSEAS Press, (Applied computer science, ISSN 1792-4863), 375–379. ISBN 9789604742257.

Bansevicius, R.; Kulvietis, G.; Grigoravičius, A. 2013. Simulation and Investigation of Active Piezoelectric Actuators, in *Proceedings of the 18th International Conference on Mechanika 2013*, April 4–5, 2013, Kaunas, Lithuania, Kaunas University of Technology. Technologija, 17–20. ISSN 1822-2951.

Summary in English

Introduction

The problem of research

The research of the piezotransducers of microrobots with nanometric resolution faces many mechanical, materials-related, management of systems and computer science problems. Each aspect of the piezotransducers of microrobots with nanometric resolution research has its own emerging issues and challenges to deal with. Numerical modelling of piezotransducers allows us to present important information about eigenfrequencies of investigated piezotransducer, estimated geometrical parameters, and the configuration of electrodes and excitation zones. This allows carrying out experimental studies with the data model known in advance, reducing the number of attempts and time of labor resources, as well as lowering the cost of materials. So it is very important to collect more accurate information about the model while solving linear tasks.

The process of numerical modelling is automated and standardized as much as possible. Usually the method of finite elements is applied to numerical researches of the piezotransducers of microrobots with nanometric resolution. FEM is also maintained in many other programme packages.

While carrying out the numerical modelling of quite simple model and using the standard devices of ANSYS, works of modelling take more time. A person having not enough experience with programme package, meets difficulties finding necessary implements in tree of tools. Descriptions of material qualities, works of model drawing, selection of net, etc. take quite a lot of time. Later, the selection of results of numerical

modelling, processing from files, application of mathematical formulas. That is why this principle of work does not fit and non-standard ways of solution should be found, i. e. the numerical researches of the piezotransducers with nanometric resolution should be automated as much as possible.

Topicality of the work

Rapid development of global industry and production promotes to intensify scientific researches and generate effective technologies, determining the quality of new production. It is normal, that difficult systems such as microrobots with nanometric resolution are analysed, modeled and explored numerically. Due to this, it is attempted to automate the process of numerical modelling of microrobots with nanometric resolution as much as possible.

The dissertation suggests the automation mechanism of implements of numerical modelling, which facilitates the modelling of the piezotransducers of microrobots with nanometric resolution and allows to automate numerical researches.

The paper presents the numerical modelling techniques of the piezotransducers of microrobots with nanometric resolution, the finite element method was applied for the numerical analysis. Numerical models have been used dealing with such tasks as the designing of rectangle, ring, and cylinder-shaped piezotransducers of microrobots with nanometric resolution and designing of active engine restraints of the microrobots with nanometric resolution, while setting their eigenforms, solving establishment tasks of rational geometrical parameters, performing the research of dynamics, finding the dependence of the contact point motion trajectory on excitation schemes. Contact point trajectories are chosen to manage the respective piezoelectric element excitation scheme and the topology of the electrodes, which are particularly relevant exciting oscillations of various directions.

The object of research

The object of research – the numerical models of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution.

The aim of the research

The aim of the research is to create the numerical models of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution, which would allow to define rational geometrical parameters and movement trajectories of the contact points, using automate process of numerical modelling.

The objectives of the research

1. To perform the analysis of numerical modelling work's of the microrobots with nanometric resolution.
2. To investigate the methods of numerical modelling of the microrobots with nanometric resolution.
3. To create the models of planar piezotransducers of microrobots with nanometric resolution.

4. To create the models of spatial piezotransducers of microrobots with nanometric resolution.

Methods of the research

Analytical, numerical and comparative analysis methods were used in this work. Overview of related scientific works has been carried out in accordance with the methodology of systematic review of literature. The dynamics tasks of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution were solved using the finite element method. The calculations were carried out using the finite element method software package ANSYS 10 and programmes developed by the author. While summarizing the results and providing practical guidelines the generalisation method was applied.

Scientific novelty

While preparing the dissertation the following results were obtained which are new for engineering informatics science:

1. The mechanism of numerical modelling implements automation was created, which facilitates the modelling of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution and allows to automate numerical researches.
2. Numerical models and identification methodology of rational geometrical parameters of planar and spatial piezotransducers of microrobots with nanometric resolution were created which will be applied in integrated systems while joining several piezotransducers into one system, by this increasing the number of freedom degrees.

Practical significance of the work

The numerical studies of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution were carried out by the group of scientists in project “Mechatronic nanometers resolution multidimensional robotic devices modelling and management”, 2010–2013. Contract no.: MIP-122/2010; MIP-075/2012. The results of numerical research will be used in practice in order to create and actualize mechatronical systems of nanometric resolution.

Defended propositions

1. Combination of several planar or spatial piezotransducers of microrobots with nanometric resolution to one system increases the number of freedom degrees.
2. The created automation of numerical modelling implements facilitated the process of research of numerical modelling and saved third of working time.

Approval of the research results

Dissertation topic is printed in seven scientific articles, four – in scientific journals included in the Thomson ISI (Web of Science) list (Grigoravičius 2012; 2013a; 2013b; 2014), two – in materials of international conferences included in Thomson ISI (ISI Proceeding) list (Grigoravičius 2010b; 2013c), one – in materials of other international databases (Grigoravičius 2010a).

Dissertation research results have been published in three international scientific conferences.

- Discourse in *Proceedings of the International Conference on Applied Computer Science (ACS)*, September 15–17, 2010, Malta.
- Discourse in *Proceedings of the 18th International Conference on Mechanika 2013*, April 4–5, 2013, Kaunas.
- Discourse in *International Conference on Vibroengineering–2013*, September 15–17, 2013, Druskininkai.

The structure of the dissertation

The dissertation work consists of an introduction of the dissertation, 4 chapters, general conclusions, list of author's publications and annexes. The total scope of the dissertation – 139 pages, 47 indexed equations, 80 pictures. 99 references were used in a thesis.

1. The analysis of numerical modelling works of piezotransducers

While summarizing the analysis of theoretical researches it can be claimed that oscillations of different parameters are most usually excited in piezotransducers of different geometrical forms. Although there are cases when the same characteristics of oscillations can be obtained using piezotransducers with different geometrical parameters.

The form, area and topology of electrodes arrangement are several most important characteristics of piezotransducers. Therefore while selecting the geometrical form of electrodes, places of arrangement and changing the phase of excitation voltage, different forms and frequencies of resonant oscillations can be obtained.

While doing the analysis, electrical and marginal conditions should be taken into account, which have significant impact on the oscillations of piezotransducers.

While designing the multicomponent systems of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution, multicomponent oscillations are obtained by joining vibrations of different types, which are constructed applying combinations of the same frequencies with two sources of oscillations of resonant forms.

The main directions of piezotransducers researches were presented, Lithuanian and foreign scientific researches of piezotransducers and related problems were overviewed. “Vibrotechnika” scientific school and working groups in mechanical engineering and information technologies science fields were presented.

2. The research of methods of piezotransducers

Structural analysis involving the application of the displacement method has been and continues to be very popular, therefore, it became a small displacement theorem based

on the development of the finite element model. In the numerical study, when the research model is approximated with finite-size elements, it is effective to apply the finite element method. The finite element method is used to solve all the standard piezomechanic systems tasks. The calculations were carried out using the finite element method software package ANSYS 10 and programmes developed by the author.

The analysis of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution while solving linear tasks is focused on the vibration generating device, so the most convenient for piezotransducers study tasks solving is to use the entire facility. In addition, piezotransducers are attributed to the combined fields systems, so while analysing any linear tasks of the piezotransducers of microrobots with nanometric resolution, the mechanical and electrical fields interaction is evaluated.

While exciting one type of resonant vibrations the concentration of tension increases and the influence of extraneous vibrations on the motion of piezotransducers appears. So one of the most relevant problems in the research of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution is the selection of geometrical parameters and identification of the piezotransducers' excitation areas configuration, so that the excited vibrations correspond to one of the piezotransducers eigenforms. By changing geometrical parameters of piezotransducers, we face the problem, which is related to the change of the eigenforms sequence. Global dominance coefficients are used for recognition of eigenforms.

The operation of the system of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution is based on the principle of impact contact between moving and stationary parts of the system. The main condition for the functioning of such a system is the trajectory of the elliptical contact point movement, which is usually obtained through the vibration mode superposition or shifted excitation signal phase principles.

While carrying out the numerical modelling of quite simple model and using the standard devices of ANSYS, works of modelling take more time. A person having not enough experience with programme package, meets difficulties finding necessary implements in tree of tools. Descriptions of material qualities, works of model drawing, selection of net, etc. takes quite a lot of time. Later, the selection of results of numerical modelling, processing from files, application of mathematical formulas. The principle of manual work would do if we need to model several models. But in order to identify rational geometrical parameters, suitable configuration of electrodes, eigenfrequencies and eigenforms, the elliptical trajectories of contact points, we need to investigate numerically several dozen of models.

Therefore, the dissertation suggests the automation of numerical modelling implements, which facilitates the work of the research, by eliminating the usage of standard implements from the tree of tools in environment of ANSYS, the obtained processing of results of numerical modelling from files and application of mathematical formulas in manual way, saving about third of working time.

3. The numerical models of planar piezotransducers

This section describes the set up and explored numerical models of the rectangular and ring-shaped piezotransducers of microrobots with nanometric resolution. Discrete models and electrode configurations are provided on the basis of rectangular and ring-shaped numerical modelling of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution. The rational geometrical parameters were found, the eigenvalues tasks were solved, and the trajectories of selected contact points were examined. Global dominance coefficients were used for recognition of eigenforms. The numerical modelling of the excited rectangular-shaped piezotransducer, which was used for the laser valve closure, was performed under the harmonic excitation. The resonant frequencies of the ring-shaped piezotransducer under the harmonic excitation of the selected excitation spectrum, which ensure ring rotation and bending, are provided. The influence of the ring fortifying elements on its rotation and bending was examined as well.

The model of a laser shutter is composed of rectangular-shaped piezoceramic plate with two degrees of freedom and two partial cylinders at both sides (Fig. 1S).

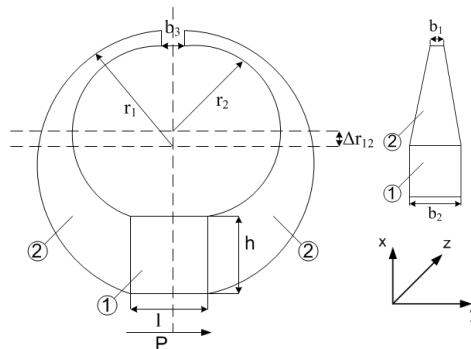


Fig. 1S. The scheme of a laser shutter

While choosing the geometrical parameters of the laser shutter finite element models, the following aspects were taken into account: if the laser excited valve closes tightly and whether the closing intensity of valves is technologically rational. Having solved the eigenvalue tasks, the eigenforms of the laser shutter were obtained, provided in Figure 2S.

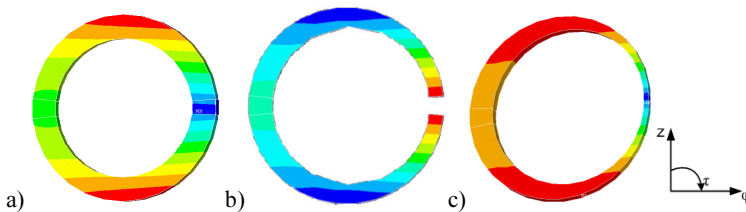


Fig. 2S. Laser shutter eigenforms given with different geometrical parameters

While modelling the laser shutter and choosing the different ratio of geometrical dimensions, it was observed that when reducing the distance Δr_{12} (Fig. 1S) between the inner and outer partial cylinder radii and at the same time reducing the width of the partial cylinder's upper beam b_1 (Fig. 1S) the eigenfrequency of the laser shutter increased.

The highest domination coefficients were obtained in tangential direction, which means that the laser shutter bending movements, which are necessary for the valve of the laser shutter to close, dominate. The first model (Fig. 2Sa) is selected as suitable to close the laser shutter.

In the next laser shutter modelling phase, elliptical movement trajectories of the selected contact points at the ends of the beams on x, z and y, z axes were analysed. Detailed studies were carried out for four contact points, located at the ends of the beams of the laser shutter. The arrangement of selected points is provided in Figure 3S.

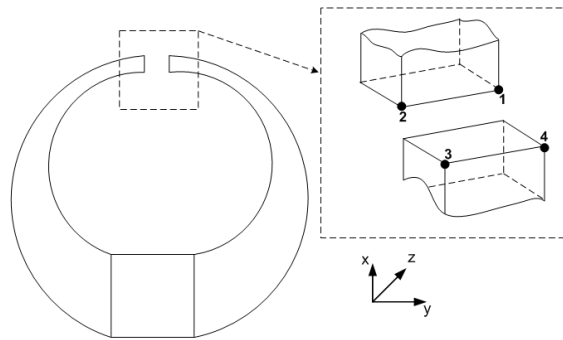


Fig. 3S. The selected contact points at the ends of the laser shutter beams for detailed displacement and their movement investigation

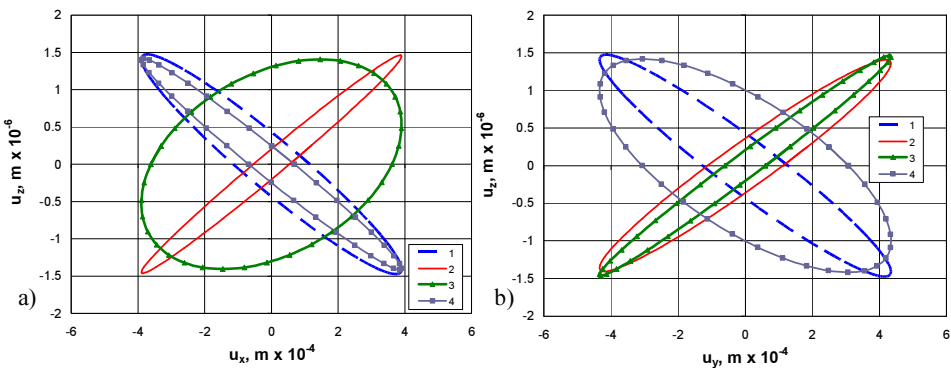


Fig. 4S. The elliptical trajectories of the selected contact points at the ends of the beams on x, z (a) and y, z (b) axes

After examining the elliptical trajectories of the selected contact points at the ends of the laser shutter beams according to x , z and y , z axes, evaluating relative sizes of their major and minor axes and rotating angles at different sizes, the model suitable to close the laser shutter was chosen, which distance Δr_{12} between inner and outer radii of the partial cylinders is 0.006 m, the width b_1 of upper part of beam of partial cylinders is 0.005 m and is excited at the frequency of 823 Hz. Elliptical movement trajectories are provided in Figure 4S.

In the next step a piezoceramic ring with two degrees of freedom was modeled, its scheme is provided in Figure 5S. Rotating and bending movements were examined in the piezoceramic excited ring, these movements enable the system to position itself at the plane in the desired direction. The results of numerical modelling allowed us to provide important information about eigenfrequencies of piezotransducer. Rational geometrical parameters of the ring were found. Movement trajectories of the selected contact points and the influence of the different sizes of the fortifying elements on the movement of the ring were studied.

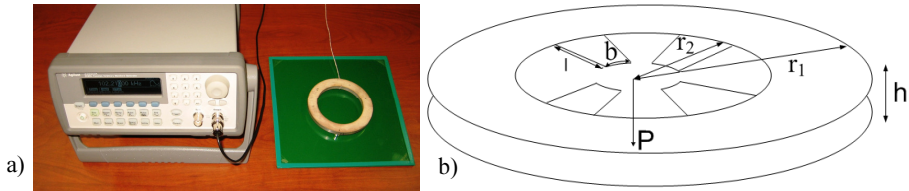


Fig. 5S. Model schemes: a) the scheme of the experimental model (Bansevicius 2007);
b) the scheme of the ring

In the modal part of the research all in all twelve finite element models were examined, at the same time establishing rational outer r_1 and inner r_2 radii of the piezoceramic ring and the width b of the fortifying elements stems.

The deployment of the geometrical parameters is provided in Figure 5S. Having solved the eigenvalue tasks, eigenforms selected for further investigations are given in Figure 6Sa and Figure 6Sc, when the rotation and bending were achieved in the piezoceramic ring, and when the inner radius r_1 was changed in the interval from 0.01 m to 0.0175 m. In order to find out what influence the ring fortifying elements had on the eigenfrequency the piezoceramic ring was re-modeled. The results are provided in Figure 6Sb and Figure 6Sd.

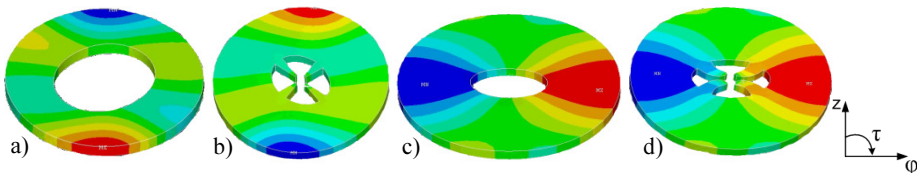


Fig. 6S. Ring eigenforms: when the rotation and bending were achieved

While modelling the piezoceramic ring and choosing different geometrical dimensions of the outer radius, it was observed that the eigenfrequency decreased when the bending was achieved through the increase of the radius.

However, the change of the outer ring radius influenced the eigenfrequency only a little, when the bending was achieved, it remained almost unchanged and reached about 30 kHz.

When the fortifying elements were added to the model it was observed that, while increasing the ring fortifying stem width and achieving rotation and bending of the ring, the eigenfrequency of the piezoceramic ring increased marginally.

After evaluating the eight obtained values of the domination coefficients, when the inner and outer radii were changed, the model of ring rotation was obtained, which outer radius was 0.0125 m and the contact points displacements in tangential direction were 84%. In the meantime, bending model of the ring is the one with the outer radius r_1 of 0.0175 m.

The displacements of the contact points in the direction of bending in this model were 89%. In order to find out what influence the ring fortifying elements have on the ring movement, the dependence of the values of domination coefficients on the fortifying stem width of a supplemented ring model was calculated.

The obtained results showed that the model with the fortifying stem width of 0.0034907 m made the least negative impact on the rotation of the ring. In this model, the displacements of the contact points in the tangential direction were 82% (i. e., 1% less than in the model without fortifying elements).

In the meantime, the model with the fortifying stem width of 0.005236 m made the least negative impact on the ring bending.

In this model the displacement of contact points in the direction of bending was 81% (i. e., 8% less than the model without the fortifying elements).

So the fortifying elements made the most negative effect on the ring bending motion.

The resonant frequencies of the ring-shaped piezotransducer in the selected excitation frequency spectrum were established, the elliptical movement trajectories of selected contact points were set, and the influence of the fortifying elements was measured.

Detailed studies of four points in the upper part of the ring were carried out. The arrangement of the selected points is provided in Figure 7S.

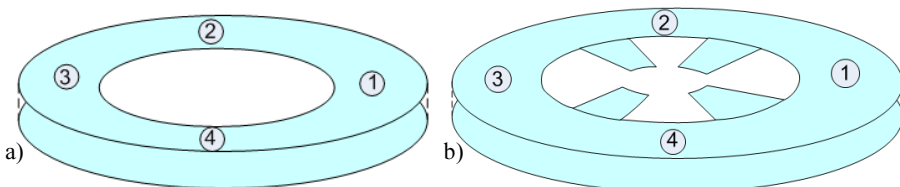


Fig. 7S. The selected contact points at the upper part of the ring for detailed displacement and their movement investigation: a) Piezoceramic ring without fortifying elements; b) Piezoceramic ring with a fortifying element

The Figure 8S shows the movement trajectories of the selected points in the upper part of the ring (Fig. 7S) according to x, z and y, z axes, when the rotation was achieved.

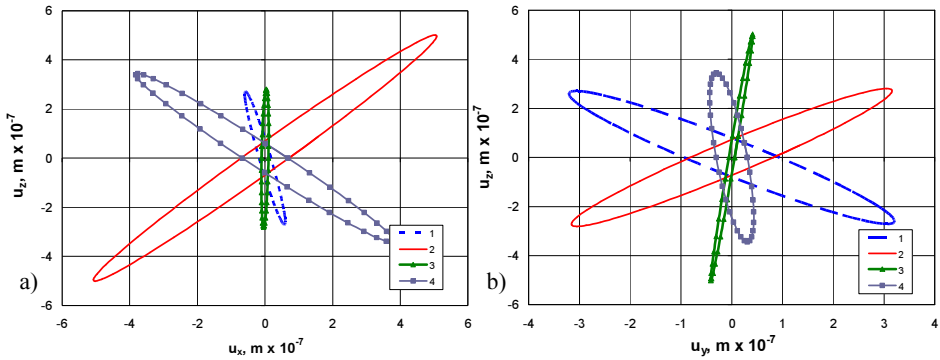


Fig. 8S. The elliptical trajectories of the selected contact points in the upper part of the ring according to x, z (a) and y, z (b) axes, when the rotation was achieved

The Figure 9S shows selected points in the upper part of the ring movement trajectories according to x, z and y, z axes, when the bending was achieved.

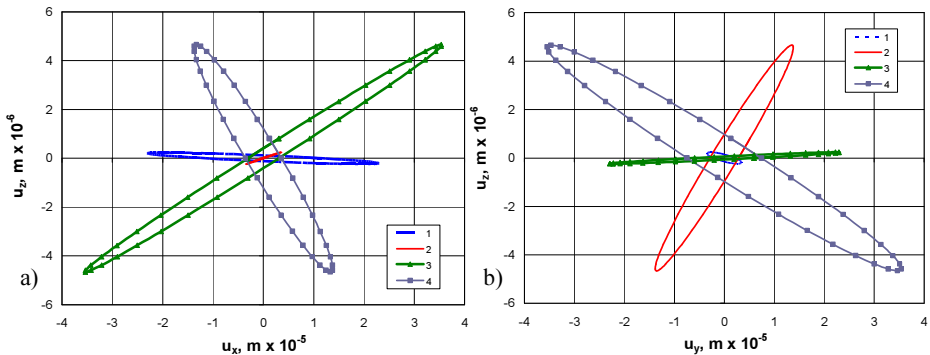


Fig. 9S. The elliptical trajectory of the selected contact points at the upper part of the ring according to x, z (a) and y, z (b) axes, when the bending was achieved

After examining the elliptical trajectories of the selected points in the upper part of the ring according to x, z and y, z axes, and evaluating the relative sizes of their major and minor axes and the rotation angles at the different geometrical parameters and eigenfrequencies, the model was chosen for the rotation of the ring, when the outer radius r_1 of piezoceramic ring is 0.0125 m and it is excited at the frequency of 107.4 kHz. When it is necessary for the ring structure to have the fortifying elements, the fortifying element with the fortifying stem width of 0.0034907 m, which is excited at 89.4 kHz, has the least effect on the activity of rotational movement.

In the meantime, the model was chosen for the bending of the ring, when the outer radius r_1 of the piezoceramic ring is 0.0175 m and it is excited at the frequency of 29.2 kHz. When it is necessary for the ring structure to have the fortifying elements, then the fortifying element with the fortifying stem width of 0.005236 m, which is excited at 33.1 kHz, has the least effect on the activity of the bending movement.

4. The numerical models of spatial piezotransducers

This section describes the models of cylinder-shaped piezotransducers of microrobots with nanometric resolution and the numerical models of active bearing that were set up and explored. After accomplishing the investigation of cylinder-shaped piezotransducers of microrobots with nanometric resolution and the finite elements of active bearing, discrete models and electrode configurations were presented. The rational geometrical parameters were established, the eigenvalues tasks were solved, the trajectories of selected contact points were examined. Global dominance coefficients were used for the recognition of the eigenforms. The analysis of traveling wave, which has been excited in the upper part of the cylinder, under harmonic excitation was done. The active bearing resonant frequencies at harmonic excitation in the selected excitation spectrum were given, which ensure shaft rotation and movement along the axis of the shaft. The contact points of the active bearing disk wall cutout, which have contact with the shaft, were found.

In this chapter the piezoceramic cylinder with three degrees of freedom was analysed, the scheme is provided in Figure 10S. The travelling wave of the analysed piezoceramic cylinder was excited and this enabled the system to position itself at the plane in the desired direction and to lift the mass placed on the cylinder.

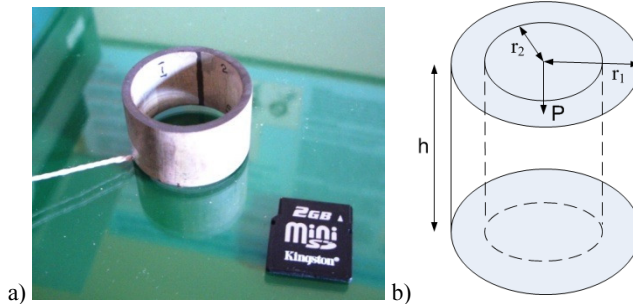


Fig. 10S. Model schemes: a) the scheme of the experimental model (Bansevicius 2007);
b) the scheme of cylinder

When selecting the geometrical parameters of the numerical models of piezoceramic cylinder, it was taken into account that the travelling wave at the top of the cylinder ensures the movement of the piezoceramic cylinder on a flat surface.

The travelling wave was obtained using the longitudinal movement of the cylinder and the cylinder rotation.

In the modal part of the research, while establishing the rational geometrical parameters of the piezoceramic cylinder, four models were examined. The cylinder's height h (Fig. 10S) was selected as variable size. Having solved the eigenvalue tasks, it was obtained that the piezoelectric cylinder model with a height of 0.03 m fits to shape the travelling wave, the eigenform is presented in Figure 11S.

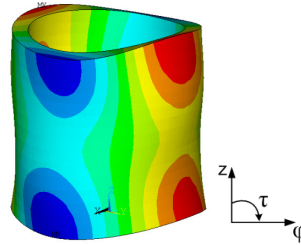


Fig. 11S. The obtained eigenform of the piezoceramic cylinder at 35.4 kHz

While modelling the piezoceramic cylinder and choosing the different ratio of geometrical dimensions, it was observed that while reducing the height of the cylinder the eigenfrequency of the piezoceramic cylinder increased.

After analyzing the influence of the geometrical parameters on the domination coefficients and eigenfrequencies, on the basis of the obtained results, the piezoceramic cylinder model with a height of 0.03 m was selected to form the running wave.

The next step in the process of modelling the piezoceramic cylinder was the analysis of the travelling wave in case of harmonic excitation. The objective was to identify the elliptical motion trajectories of the cylinder-shaped piezotransducers belonging to a nanometric resolution microrobot.

In this part of the study the elliptical movement trajectories of the selected contact points in the upper part of the piezoceramic cylinder (Fig. 12S).

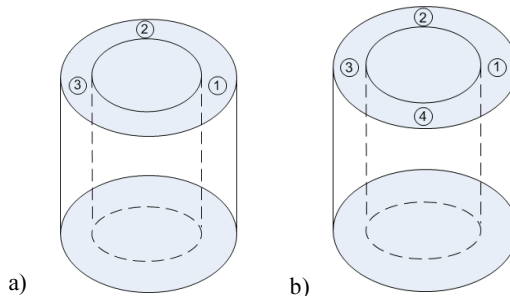


Fig. 12S. The selected contact points at the upper part of the piezoceramic cylinder for detailed displacement and their movement investigation: a) when the piezoceramic cylinder was excited to generate the travelling wave symmetrically; b) when the piezoceramic cylinder was excited to generate the travelling wave asymmetrically

The Figures 13S and 14S presented below depict the movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on x, z and y, z axes at 35.4 kHz eigenfrequency when the height of the cylinder was 0.03 m.

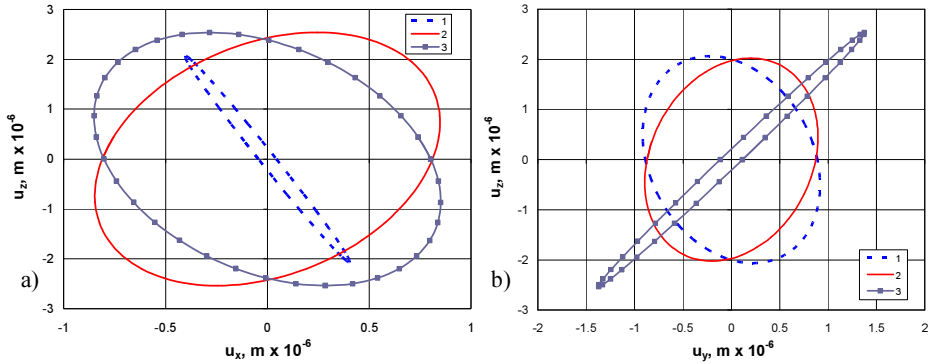


Fig. 13S. Movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on x, z (a) and y, z (b) axes

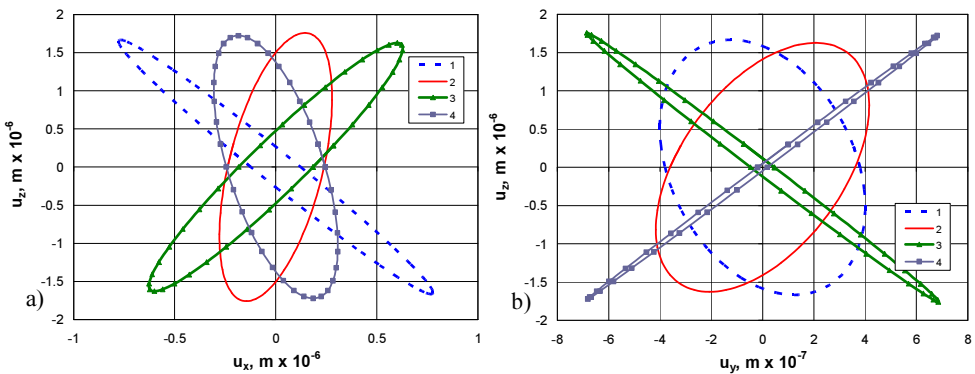


Fig. 14S. Movement trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on x, z (a) and y, z (b) axes

After examining the elliptical trajectories of selected points in the upper part of the cylinder on x, z and y, z axes and evaluating their relative sizes in major and minor axes and rotation angles at different geometrical parameters, eigenfrequencies and excitation ways, the travelling wave was obtained. This travelling wave is necessary to move the cylinder on plane at 35.4 kHz eigenfrequency, when the height of the piezoceramic cylinder is 0.03 m and it is excited by asymmetrical electrode scheme.

This chapter also describes the modelling of “V”-shaped active bearing with three degrees of freedom. The excited active bearing ensured that the shaft placed in a “V”-shape grooves rotates and moves along its axis. The model of the active bearing

consists of two discs integrated into a rectangular base, the scheme is provided in Figure 15S.

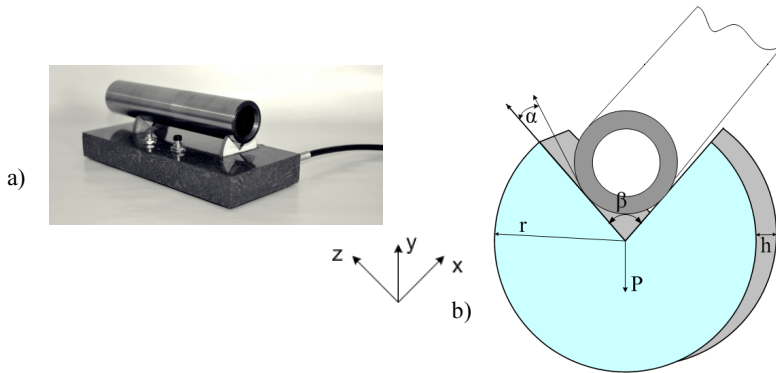


Fig. 15S. Schemes of a model: a) the scheme of general active bearing (Bansevicius *et al.* 2013); b) the scheme of disc

In the initial stage of the investigation the rational geometrical parameters of the active bearing were established, and the contact points of the wall groove, which would do to put the shaft on were searched, to enable the rotation (ζ_1) of the wall groove and the movement along its axis (ζ_2).

While establishing rational geometrical parameters of the active bearing, twelve models were examined, when the width of disc h , radius of disc r , and angle of the disc groove β were changed (Fig. 15Sb).

One of the eigenforms of the active bearing is provided in Figure 16S, when the angle of disc groove was changed. It ensured the rotation of the shaft and movement along its axis at 52.8 kHz eigenfrequency.

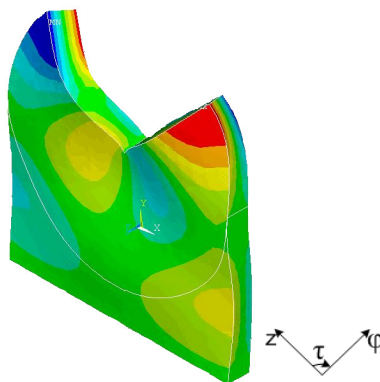


Fig. 16S. The eigenform of the active bearing

While modelling the active bearing and choosing different geometrical dimensions of the ratio, the eigenfrequency has changed insignificantly from 51.7 kHz to 53.6 kHz while increasing the angle of the disc groove.

The changes of the disc groove angle in the range from 70° to 100° had no significant impact on the eigenform place in the queue.

The width of the disc had no significant impact as well. While increasing the width of the disc from 0.002 m to 0.004 m, the eigenfrequency of the active bearing changed insignificantly from 61.7 kHz to 76.2 kHz.

While increasing the radius of the disc, the eigenfrequency of the active bearing decreased from 108.6 kHz to 33.7 kHz.

This dependence suggests that the higher the disc radius is, the less you need to excite an active bearing in order to obtain the rotation and movement of the shaft along its axis.

After analysing the influence of rational geometrical parameters on the dominance coefficients and eigenfrequencies and on the basis of the obtained results, a model, which ensures the rotation of the shaft, was chosen for the further research.

The angle of the groove of this of model is 90° and the model ensuring the movement along the shaft axis is the model with the width of the disc of 0.004 m.

The next step in the modelling process was to find the contact points of the wall groove, which would be suitable to put the shaft on, so that the excited groove would ensure rotation and the movement of the shaft along its axis.

In Figure 17S the contact points of wall groove, which were used in the analysis below, are marked.

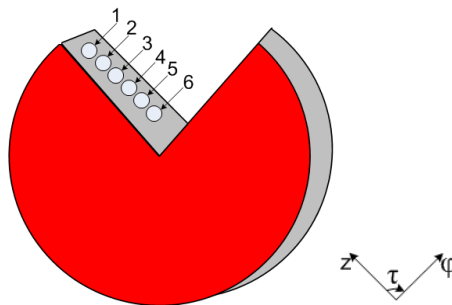


Fig. 17S. The selected contact points of the wall groove for detailed displacement and their movement investigation

In the next step the motion trajectories of elliptical contact points of the active bearing of microrobots with nanometric resolution, which the shaft contacts with, were established.

The Figures 18S presented below depict the movement trajectories of contact points of the active bearing groove on y , z axes.

After examining the elliptical movement trajectories of the contact points of the active bearing grooves on y , z axes, evaluating relative sizes of their major and minor

axes and rotation angles at different geometrical parameters and different eigenfrequencies, the results obtained in modal part were confirmed.

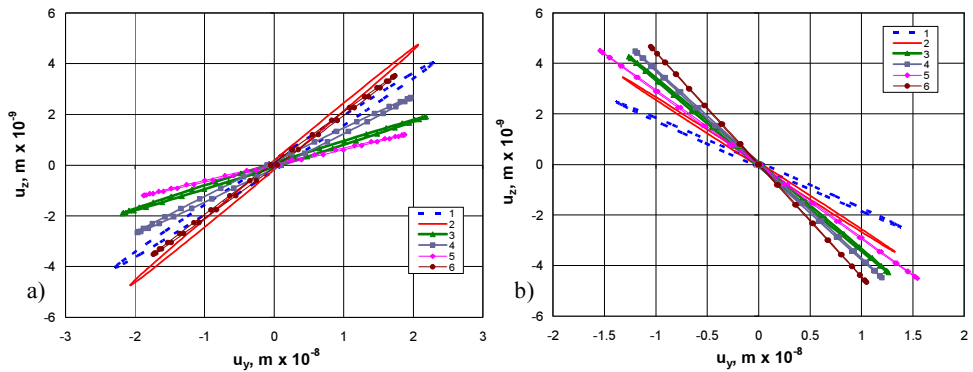


Fig. 18S. Trajectories of the selected contact points of wall groove motion by y , z axes: a) when eigenfrequency is 52.8 kHz and angle of groove is 90° ; b) when eigenfrequency is 66.6 kHz and width of disc is 0.004 m

Numerical model was chosen for the rotation of the shaft, which angle of cutout β is 90° and is excited at eigenfrequency of 52.8 kHz, whereas ensuring movement along the axis of the shaft is model which h is 0.004 m and is excited at eigenfrequency of 66.6 kHz.

Therefore, the model with the angle groove of 90° ensures the rotation and the model with the width of the disc of 0.004 m ensures the movement along the axis of the shaft.

General conclusions

1. After carrying out the review of scientific literature it was ascertained that numerical models of planar and spatial piezotransducers of microrobots with nanometric resolution which are applied in complex systems are difficult, receptive to calculation resources, and little automated while solving parameterised tasks.
2. Numerical studies have shown that finite element method is an effective numerical method while solving tasks of multi-physics type and having complicated nonlinear geometry.
3. The methodology of rational geometrical parameters identification included the establishment of algorithm of original task's solution, the selection of methods of solution, the identification of function of purpose and restrictions. The results of this solved task narrowed the sphere of search of geometrical parameters. Later, while merging the results of the research of task's component parts, the final result was formed. This algorithm is acceptable and can be used for the identification of

geometrical parameters of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution.

4. The dissertation suggests the method of numerical modelling implements automation which simplified the process of research of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution. Designed ANSYS command script generator enabled to change geometrical parameters of numerical model easily, to choose different qualities of finite elements and to get final results faster. The processing of results of system's numerical modelling of piezotransducers of microrobots with nanometric resolution in database, eliminating the handiwork, saved third of working time.

Priedai¹

- A priedas.** ANSYS programos bibliotekos trimačio modelio (3D) elementai ir medžiagos savybės
- B priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje
- C priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Artūras GRIGORAVIČIUS

NANOMETRINĖS SKYROS MIKROROBOTŲ
PJEZOKEITIKLIŲ SKAITINIS TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
informatikos inžinerija (07T)

NUMERICAL MODELLING OF PIEZOTRANSDUCERS
OF MICROROBOTS WITH NANOMETRIC RESOLUTION

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Informatics Engineering (07T)

2014 09 26. 13,25 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius