VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Raimundas LUČINSKIS

PJEZOELEKTRINIŲ KEITIKLIŲ SU ĮVAIRIAKRYPČIAIS POLIARIZAVIMO VEKTORIAIS VIRPESIŲ TYRIMAS

MOKSLO DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)

VGTU
LEIDYKLA
TECHNIKA
Vilnius 2014

Disertacija rengta 2007–2014 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

doc. dr. Dalius MAŽEIKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

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

Pirmininkas

prof. habil. dr. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Nariai:

prof. habil. dr. Rimantas BARAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, informatikos inžinerija – 07T),
prof. habil. dr. Rimantas BELEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),
prof. habil. dr. Vladas VEKTERIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),
prof. habil. dr. Mihails ZAKRŽEVSKIS (Rygos technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2014 m. vasario 14 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. sausio 13 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 2206-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-598-3

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2014
© Raimundas Lučinskis, 2014
raimundas.lucinskis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Raimundas LUČINSKIS

INVESTIGATION OF OSCILATIONS OF PIEZOELECTRIC ACTUATORS WITH MULTIDIRECTIONAL POLARIZATION VECTORS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)

VGTU
LEIDYKLA TECHNIKA
Vilnius 2014

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2014.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Assoc Prof Dr Dalius MAŽEIKA (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

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

Chairman

Prof Dr Habil Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

Members:

Prof Dr Habil Rimantas BARAUSKAS (Kaunas University of Technology, Informatics Engineering – 07T),
Prof Dr Habil Rimantas BELEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T),
Prof Dr Habil Vladas VEKTERIS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T),
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 Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a. m. on 14 February 2014**.

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 13 January 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, Lith§§uania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama įvairiakryptės poliarizacijos pjezoelektrinių keitiklių virpesių trajektrorijų formavimo problema. Tyrimų objektas yra strypo formos pjezoelektrinių keitiklių su įvairiakrypčiais poliarizavimo vektoriais daugiakomponentės virpesių trajektorijos ir keitiklių elektrodų žadinimo schemos.

Darbe sprendžiami tokie uždaviniai: dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezoelektrinių keitiklių geometrinių matmenų nustatymas ir minėtų keitiklių elektrodų konfigūracijos, leidžiančios sužadinti daugelio laisvės laipsnių virpesius, radimas.

Disertaciją sudaro disertacijos tekstas: įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, disertacijos santrauka ir du priedai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, pateikiami ginamieji teiginiai.

Pirmame skyriuje pateikiama pjezoelektrinių keitiklių ir jų taikymo apžvalga. Taip pat nagrinėjami pjezoelektrinių keitiklių, kontaktinio taško judesio trajektorijos formavimo būdai, apžvelgiamos jau sukurtos ir naudojamos pjezoelektrinių keitiklių konstrukcijos. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pasiūlomos dvi pjezokeitiklių su nevienakrypčiais poliarizacijos vektoriais konstrukcijos, pateikiamas šių keitiklių konstrukcijų veikimo principas ir keitiklių elektrodų žadinimo būdai. Sudaromi dvikryptės ir radialinės poliarizacijos keitiklių skaitiniai modeliai ir atliekamas jų tyrimas. Pasiūlytas algoritmas pjezokeitiklių elektrodų topologijai, leidžiančiai sužadinti daugiakomponenčius kontaktinio taško virpesius, apskaičiuoti.

Trečiajame skyriuje pristatomas siūlomų pjezoelektrinių keitiklių eksperimentinis tyrimas. Nagrinėjamos tariamosios varžos priklausomybės nuo keitiklio elektrodų žadinimo dažnio bei keitiklių kontaktinio taško virpesių trajektorijos, naudojant įvairias žadinimo schemas. Paskutiniame darbo skyriuje apibendrinami tyrimų rezultatai ir padaromos bendrosios darbo išvados.

Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai: keturi – recenzuojamuose moksliniuose žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI (Web of Science) sąrašą, du – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagose, referuojamose Thomson ISI (ISI proceedings) duomenų bazėje, vienas – kitame recenzuojamame moksliniame žurnale. Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

Abstract

Trajectory formation problem of piezoelectric actuators with multi-directional vector of polarization is investigated in the dissertation. The research object is the multidirectional trajectories of vibrations and excitation schemes of rod-shaped piezoelectric transducers with multidirectional vectors of polarization.

The dissertation deals with a number of key challenges: how to determine the geometry of actuator with bi-directional and radial polarization, and the electrode configuration search algorithm fo§§r bi-directional and radial polarization piezoelectric actuator.

The thesis consists of a dissertation text: introduction, three chapters, summary of results, literature and the author's list of publications on topic of dissertation, dissertation sum§mary and two annexes.

Introductory chapter discusses the problem, the relevance, the formulation of the topic and objectives of the research, describes the research methodology, scientific novelty of the work, performance and practical value, defending statements.

The first chapter is devoted to the review of piezoelectric transducers and their application. Techniques for the formation of motion trajectories of piezoelectric transducers used in ultrasonic devices are discussed as well as a brief overview of existing actuator design is given. The chapter ends with conclusions and formulated revised dissertation research tasks.

The second chapter discusses operation and excitation techniques of the two actuators with non-unidirectional vectors of polarization. Two-directional and radial polarization models of actuator are investigated numerically. The algorithm is proposed for calculation of electrode topology of the actuators. Algorithm was applied to calculate electrode topologies of aforementioned actuators.

The third chapter discusses experimental research of the proposed piezoelectric actuators. Impedance dependence from excitation frequency is investigated and contact point trajectories are analysed under different excitation regimes. Numerical and experimental results are compared, evaluated and discussed. The main observations are summarized and concluded within the general conclusion chapter.

The seven articles on the topic of dissertation were published; four – in peer-reviewed journals included in Thomson ISI (Web of Science), two – in reviewed international conference proceedings referred in Thomson ISI (ISI Proceedings) database, one – in other reviewed journal. Four presentations were given on the topic of dissertation at conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

A – pjezokeitiklio geometriniai parametrai;
b – plotis;
c – tampriųjų virpesių sklidimo greitis;
E – Jungo modulis;
ε_0 – dielektrinė konstanta;
ε – dielektrinė skvarba;
F – jėga;
h – aukštis;
k_n – išilginės virpesių formos numeris;
k_p – elektromechaninis koeficientas;
I – inercijos momentas;
l – ilgis;
n – skersinių virpesių formos numeris;
ρ – tankis;
ω – tikrinis dažnis;
ν – Puasono koeficientas;
Y – tariamasis laidumas;
Z – tariamoji varža;
R – nuostolių varža;

C – talpa;
L – virpančiosios sistemos inercija;
W – energija;
$[C]$ – slopinimo matrica;
$[d]$ – pjezoelektrinių modulių matrica;
$[e]$ – pjezoelektrinių konstantų matrica;
$[\varepsilon^{\epsilon}]$ – dielektrinių konstantų matrica;
$[g]$ – pjezoelektrinė koeficientų matrica;
$[c^{E}]$ – tamprumo matrica, esant pastoviam elektrinio lauko stiprumui;
$[K]$ – standumo matrica;
$[M]$ – masės matrica;
$[S]$ – talpinė matrica;
$[T]$ – elektromechaninė matrica;
$\{\sigma\}$ – mechaninių įtempių vektorius;
$\{\phi\}$ – elektrinių potencialų vektorius;
$\{u\}$ – poslinkių vektorius;
$\{D\}$ – elektrinės indukcijos vektorius;
$\{F\}$ – mazginių apkrovų vektorius;
$\{Q\}$ – elektros krūvių vektorius;
$\{S\}$ – mechaninių deformacijų vektorius;
$\{E\}$ – elektrinio lauko stiprumo vektorius;
$\{P\}$ – poliarizacijos vektorius.

Turinys

ĮVADAS 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 4
Ginamieji teiginiai 4
Darbo rezultatų aprobavimas 4
Disertacijos struktūra 5

1. PJEZOELEKTRINIŲ KEITIKLIŲ IR JŲ TAIKYMO VIRPAMOSIOSE SISTEMOSE APŽVALGA 7
1.1. Pjezoefekto reiškinio apžvalga 7
1.2. Pjezokeraminių komponentų konstrukcijos 20
1.3. Pjezoelektrinių keitiklių konstrukcijos ir jų taikymas 24
1.3.1. Elipsinės trajektorijos formavimas pjezoelektriniais keitikliais 25
1.3.2. Stovinčios bangos tipo pjezoelektriniai keitikliai ir jų taikymas 28
1.3.3. Bėgančios bangos tipo pjezoelektriniai keitikliai ir jų taikymas 30

1.3.4. Mišraus tipo daugelio laisvės laipsnių pjezoelektriniai keitikliai ir jų taikymas 33
1.4. Pjezoelektrinių keitiklių tyrimų apžvalga 34
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 37

2. ELIPSINIŲ TRAJEKTORIJŲ FORMAVIMAS PJEZOELEKTRINIAIS KEITIKLIAIS SU NEVIENAKRYPČIAIS POLIARIZACIJOS VEKTORIAIS 39
2.1. Nevienakryptės poliarizacijos panaudojimas daugiakomponentiniams simetriniams virpesiams generuoti 40
2.1.1. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektorių kryptimis modelis 42
2.1.2. Pjezoelektrinio keitiklio su radialine poliarizacijos vektorių kryptimi modelis 47
2.2. Pjezokeitiklių skaitiniai modeliai 49
2.3. Keitiklių elektrodų topologijos 53
2.3.1. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos kryptimis elektrodų topologija 56
2.3.2. Pjezoelektrinio keitiklio su radialine poliarizacijos vektorių kryptimi elektrodų topologija 57
2.4. Pjezokeitiklių harmoninių virpesių analizė 60
2.4.1. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos kryptimis kontaktinio taško trajektorijų formavimas esant skirtingoms elektrodų žadinimo schemoms 60
2.4.2. Pjezoelektrinio keitiklio su radialine poliarizacijos vektorių kryptimi kontaktinio taško trajektorijų formavimas esant skirtingoms elektrodų žadinimo schemoms 62
2.5. Antrojo skyriaus išvados 65

3. EKSPERIMENTINIS KEITIKLIŲ TYRIMAS 67
3.1. Pjezoelektrinių keitiklių prototipų gamyba 68
3.1.1. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektorių kryptimis gamyba 68
3.1.2. Pjezoelektrinio keitiklio su radialine poliarizacija gamyba 70
3.2. Pjezokeitiklių tariamosios varžos matavimai 71
3.2.1. Dviejų poliarizacijos krypčių pjezokeitiklio dažninė impedanso charakteristika 72
3.2.2. Cilindrinio pjezokeitiklio dažninė impedanso charakteristika 75
3.3. Eksperimentinis stendas 78
3.4. Keitiklio kontaktinio taško trajektorijų matavimai 80
3.4.1. Dviejų poliarizacijos krypčių pjezokeitiklio kontaktinio taško trajektorijos 82
3.4.2. Cilindrinio pjezokeitiklio kontaktinio taško trajektorijos 84

3.5. Trečiojo skyriaus išvados 87

BENDROSIOS IŠVADOS 89

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 91

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS 101

SUMMARY IN ENGLISH 97

PRIEDAI 113
A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje 113
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos 113

Contents

INTRODUCTION 1
The problem of research 1
Topicality of the work 2
The object of research 2
Aim of the work 2
Tasks of the work 3
Methodology of research 3
Scientific novelty 3
Practical value 4
Defended propositions 4
Approval of the work results 4
The scope of the scientific work 5

1. PIEZOELECTRIC ACTUATORS AND THEIR APPLICATION IN VIBRATING SYSTEMS 7
1.1. Overview of the piezoelectric phenomenon 7
1.2. Construction of the piezoceramic elements 20
1.3. Design and application of piezoelectric actuators 24
1.3.1. Elliptical trajectory formation on piezoactuators 25

1.3.2. Standing wave type piezoelectric transducers and their applications....28
1.3.3. Traveling wave type piezoelectric actuators and their applications....30
1.3.4. Piezoelectric actuators of mixed type with multiple degree of freedom and their application....33
1.4. Overview of piezoelecttric actuators research....34
1.5. Concl usions of the chapter 1 and formulation of the tasks of dissertation....37

2. FORMATION OF ELLIPTICAL TRAJECTORIES ON PIEZOELECTRIC ACTUATORS WITH NON-UNIDIRECTIONAL POLARIZATION VECTORS....39
2.1. Application of non-unidirectional polarization for generation of multi-directional symmetric vibrations....40
2.1.1. Model of piezoelectric actuator with two-directional vector of polarization....42
2.1.2. Model of piezoelectric actuator with radial polarization....47
2.2. Numerical model of the actuators....49
2.3. Electrodes topology of actuators....53
2.3.1. Electrodes topology of actuator with two-directional vector of polarization....56
2.3.2. Electrodes topology of actuator with radial polarization....57
2.4. Harmonic response analysis of piezoactuators....60
2.4.1. The forming of the contact point trajectories on piezoelectric actuator with two polarization directions at different excitation schemes of the electrodes....60
2.4.2. The forming of the contact point trajectories on piezoelectric actuator with radial polarization at different excitation schemes of the electrodes....62
2.5. Conclusions of the chapter 2....65

3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF ACTUATORS....67
3.1. Manufacturing of prototypes of piezoelectric actuators....68
3.1.1. Manufacturing of piezoelectric actuator with two-directional vector of polarization....68
3.1.2. Manufacturing of piezoelectric actuator with radial polarization....70
3.2. Measurements of piezoactuators impedances....71
3.2.1. Impedance frequency characteristic of actuator with two-directional vector of polarization....72

3.2.2. Impedance frequency characteristic of actuator with radial polarization 75
3.3. Experimental stand 78
3.4. Measurements of trajectories of actuators contact point 80
3.4.1. Trajectories of contact point of actuator with two-directional vector of polarization 82
3.4.2. Trajectories of contact point of actuator with radial polarization 84
3.5. Conclusions of the chapter 3 87

GENERAL CONCLUSIONS 89

REFERENCES 91

AUTHOR'S LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION 101

SUMMARY IN ENGLISH 103

ANNEXES 113
Annex A. The co-authors agreement to present publication. 114
Annex B. Copies of author scientific publications on the subject of dissertation 121

Įvadas

Problemos formulavimas

Pastaruoju metu, sparčiai vystantis mokslui ir technologijoms, nuolat iškyla didelio tikslumo ir jautrumo mechanizmų poreikis, todėl vis dažniau pramoniniuose manipuliatoriuose, robotuose, mikrovarikliuose bei kituose preciziniuose įrenginiuose naudojami pjezomechaniniai ultragarsiniai judesio keitikliai. Dažniausiai tai nesudėtingos geometrinės formos elementai: strypai, plokštelės, cilindrai, pagaminti iš pjezoaktyvių medžiagų. Pjezoelektriniuose keitikliuose elektriniais signalais žadinami mechaniniai virpesiai, kurių energija panaudojama kontaktuojančios sistemos judesiui gauti. Pjezokeitiklių mechaninių virpesių charakteristikos priklauso nuo medžiagos savybių, žadinimo zonų konfigūracijos bei keitiklio konstrukcijos.

Viena iš šiuolaikinių technologijų vystymosi krypčių yra mechatroninių sistemų geometrijos matmenų mažinimas ir jos konstrukcijos supaprastinimas. Tai pasiekiama kuriant daugelio laisvės laipsnių pjezoelektrinius keitiklius. Tokios mechatroninės sistemos pasižymi didesniu patikimumu ir tikslumu.

Disertacijoje tiriami daugiakomponentinių virpesių žadinimo būdai įvairiakryptės poliarizacijos pjezoelektriniuose strypo formos keitikliuose. Darbe pasiūlytos pjezoelektrinių keitiklių konstrukcijos, nustatyti keitiklių geometriniai

parametrai, apskaičiuotos keitiklių elektrodų topologijos ir nustatomos keitiklio žadinimo schemos. Šio sudėtingo uždavinio sprendimui naudojami skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimų metodai. Skaitinis pjezokeitiklių modeliavimas atliktas taikant baigtinių elementų metodą. Remiantis skaitinio tyrimo rezultatais buvo pagaminti pjezoelektrinių keitiklių prototipai ir atlikti jų eksperimentiniai tyrimai.

Darbo aktualumas

Pjezomechaninės sistemos pradėtos tyrinėti dar XX a. pradžioje, tačiau aktyvūs moksliniai tyrimai pradėti vykdyti tik amžiaus antroje pusėje. Pastaruoju metu intensyviai tyrinėjami mažų gabaritų, daugelio laisvės laipsnių ultragarsiniai pjezoelektriniai keitikliai, naudojami poslinkiams realizuoti. Tokie pjezokeitikliai taikomi pramoniniuose robotose, mobiliuose įrenginiuose, lazerinėje technikoje, medicininėje aparatūroje bei kosminiuose palydovuose. Taip pat matomos didžiulės galimybės taikyti šias sistemas ir nanotechnologijų kūrime. Taigi, reikalingas gilesnis fizikinis požiūris į naujų, šiuolaikinius reikalavimus atitinkančių, pjezoelektrinių keitiklių kūrimą.

Keitiklių, skirtų postūmiui realizuoti, pagrindinė funkcija – sąveikos su kitu kietu kūnu taške sukurti uždarą elipsinę judesio trajektoriją. Norint tai realizuoti, iškyla kitas uždavinys t. y. kaip sukurti tam tikros geometrinės formos konstrukciją (dažniausiai tai metalinių ir pjezokeramikos elementų derinys), kurioje tampriųjų deformacijų banga sklistų taip, kad reikiami jo taškai judėtų elipsės trajektorija. Be to judesiai būtų valdomi, stabilūs ir sąveikaudami su kitais kūnais išlaikytų reikiamus dinaminius parametrus.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – pjezoelektrinių strypo formos keitiklių su įvairiakrypčiais poliarizavimo vektoriais daugiakomponentės virpesių trajektorijos ir keitiklių elektrodų žadinimo schemos.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – pritaikyti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos strypo formos pjezoelektrinius keitiklius daugiakomponenčių kontaktinio taško trajektorijų žadinimui, nustatyti keitiklio geometriją ir elektrodų žadinimo schemas.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti literatūros analizę apie pjezoelektrinių keitiklių konstrukcijas, veikimo principus ir judesio trajektorijų formavimo metodus.
2. Sukurti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezokeitiklių skaitinius modelius ir atlikti jų tyrimą.
3. Nustatyti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos keitiklių geometrinius matmenis.
4. Sukurti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezoelektrinių keitiklių elektrodų konfigūracijos algoritmą daugiakomponenčių virpesių žadinimui.
5. Atlikti sukurtų pjezoelektrinių keitiklių eksperimentinį tyrimą ir pateikti išvadas bei rekomendacijas.

Tyrimų metodika

Darbe buvo naudojami analitiniai, skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Susijusių mokslinių darbų apžvalga buvo atliekama vadovaujantis literatūros sisteminės apžvalgos metodika. Pjezoelektrinių keitiklių virpesių analizė buvo atliekama taikant bendrąją tampriųjų virpesių sklidimo kietuose kūnuose teoriją. Keitiklių modelių skaitinis tyrimas atliktas naudojantis baigtinių elementų metodu (BEM). Eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas naudojant eksperimento planavimo metodologija. Apibendrinant gautus rezultatus buvo taikomi vertinamasis tyrimo metodas.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti sekantys mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sudarytas įvairiakryptės poliarizacijos strypinių pjezoelektrinių keitiklių elektrodų konfigūracijos paieškos algoritmas keitiklių daugiakomponenčių virpesių žadinimui.
2. Sudaryti ir ištirti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezoelektrinių keitiklių skaitiniai modeliai judesio trajektorijų tyrimui.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Šių tyrimų rezultatai atveria galimybę kurti naujos kartos pjezoelektrinius keitiklius, skirtus daugelio laisvės laipsnių ultragarsiniams varikliams ir pozicionavimo sistemoms. Pasiūlyti pjezokeitikliai turi nesudėtingą konstrukciją ir lengvai pagaminami. Visi keitiklių komponentai yra gaminami pramoniniu būdu. Taikant pasiūlytas pjezoelektrinių keitiklių konstrukcijas, galima kurti itin mažų gabaritų keitiklius. Kontaktinio taško trajektorijos parametrai t. y. elipsinės trajektorijos plokštuma, jos pusašių dydis ir jų santykis, taip pat posvyrio kampas ir judesio kryptis yra lengvai valdomi parenkant atitinkamą elektrodų žadinimo schemą, žadinimo įtampos amplitudę ir fazės skirtumą tarp žadinimo signalų, todėl elektrodų topologijos algoritmas ir žadinimo schemų formavimo principai gali būti naudojami kuriant daugelio laisvės laipsnių keitiklius.

Ginamieji teiginiai

1. Dviejų poliarizacijos vektoriaus krypčių pjezoelektrinio keitiklio strypo formos keitiklio konstrukcija generuoja daugiakomponenčius virpesius, kuriuos galima pritaikyti daugelio laisvės laipsnių slankiklio judesiams kurti.
2. Radialinės poliarizacijos strypo formos pjezoelektrinio keitiklio konstrukcija generuoja daugiakomponenčius virpesius, kuriuos galima pritaikyti daugelio laisvės laipsnių slankiklio judesiams kurti.
3. Parinkus tinkamą elektrodų konfigūraciją ir žadinimo schemas, galima žadinti keitiklio su įvairiakrypte poliarizacija kontaktinio taško elipsines trajektorijas trijose statmenose plokštumose.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 7 moksliniai straipsniai: keturi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI (Web of Science) sąrašą (Luchinskis 2008; Lucinskis, 2010; Lučinskis, 2011; Lučinskis, 2013); du – recenzuojamose tarptautinių konferencijų leidiniuose įtrauktuose į Thomson ISI (ISI Proceedings) sąrašą (Lucinskis, 2009; Lucinskis, 2011); vienas – kitų tarptautinių duomenų bazių leidinyje (Lučinskis, 2011).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo pristatyti trijose tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

- Pranešimas 14-toje tarptautinėje konferencijoje „Mechanika 2009“, 2009 m. balandžio 2–3 d., Kaune.
- Pranešimas tarptautiniame kongrese „International congress on ultrasonics“, 2011 m. rugsėjo 5–8 d., Gdanske, Lenkijoje.
- Pranešimas 10-toje tarptautinėje konferencijoje „Vibration Problems ICOVP 2011“, 2011 m. rugsėjo 5–8 d., Prahoje, Čekijos Respublikoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba. Taip pat yra du priedai.

Darbo apimtis yra 111 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 51 numeruota formulė, 58 paveikslai ir 10 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 99 literatūros šaltiniai.

1

Pjezoelektrinių keitiklių ir jų taikymo virpamosiose sistemose apžvalga

Skyriuje pateikta trumpa informacija apie pjezoelektrinį efektą, kokybinius pjezoelektrinių medžiagų parametrus, trumpai aptariami pjezoelektrinės keramikos gamybos aspektai ir dažniausiai pasitaikančios pjezoelektrinių elementų konstrukcijos. Aptariami pjezokeitiklių, skirtų judesio generavimui, kontaktinio taško virpesių trajektorijų formavimo būdai. Taip pat trumpai apžvelgiamos jau egzistuojančios pjezoelektrinių keitiklių konstrukcijos.

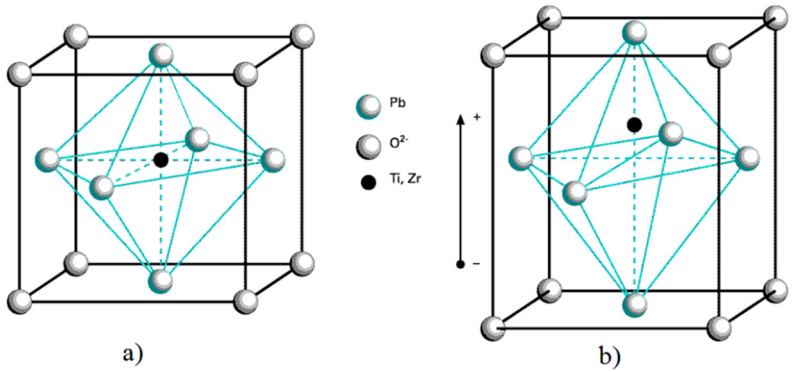
1.1. Pjezoefekto reiškinio apžvalga

Pjezoelektrinį efektą atrado Žakas ir Pjero Kiuri (Jacques & Pierre Curie) 1880 metais. Jie nustatė, kad tam tikri kristalai, veikiami mechaninių įtempimų, tampa elektriškai poliarizuoti ir poliarizacijos laipsnis yra proporcingas veikiančiam įtempimui. Kiuri taip pat nustatė, kad tos pačios medžiagos turi savybę deformuotis veikiamos elektrinio lauko. Ši savybė tapo žinoma kaip atvirkštinis pjezoelektrinis efektas (Jordan, et al., 2001; Koch, 1988).

Pjezoelektrinėmis savybėmis pasižymi natūraliai randami kristalai, tokie kaip kvarcas, turmalinas, topazas ir segneto druskos, kurie jau daugelį metų yra

naudojami elektromechaniniuose keitikliuose. Tam, kad kristalai pasižymėtų pjezoelektrinėmis savybėmis, jų gardelė privalo būti nesimetriška. Veikiant tokios struktūros kristalą tempimo ar gniuždymo jėga, atstumai tarp gardelės teigiamo ir neigiamo krūvių dalių keičiasi, todėl kristalo paviršiuose modifikuojama elektrinė poliarizacija. Šis efektas yra beveik tiesinis, t. y. poliarizacija yra tiesiogiai proporcinga veikiamai jėgai ir priklauso nuo veikimo krypties. Taigi tempimo ir gniuždymo įtempiai generuoja elektrinį lauką ir priešingo poliškumo įtampą. Šis reiškinys yra abipusis t.y jei kristalą veiksime elektriniu lauku, tai priklausomai nuo kristalo poliarizacijos krypties, jis ilgės arba trumpės (Koch, 1988).

Be anksčiau paminėtų pjezoelektrines savybes turinčių kristalų, svarbią pjezoelektrinių medžiagų grupę sudaro pjezoelektrinė keramika. Plačiausiai naudojama PZT keramika (Pb Zr Ti – švino cirkonio titanatas). Tai polikristalinė feroelektrinė medžiaga, turinti perovskito kristalų struktūrą. Tetragonalinė/romboedrinė struktūra artima kubinei (1.1 pav.). Šios medžiagos gali būti aprašomos sekančia formule: $A^{2}+B^{1}+O^{2-}{}_{3}$, kur A – tai didelis dvivalentis metalo jonas toks kaip bario ar švino; B – tai keturvalentis metalo jonas toks kaip titano ar cirkonio (Koch, 1988).



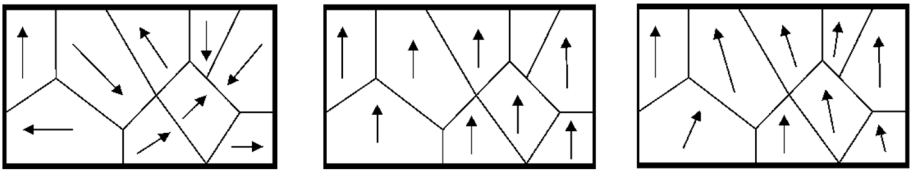
1.1 pav. Elementari PZT gardelė: a) virš Kiuri temperatūros, b) žemiau Kiuri temperatūros
Fig. 1.1. The elementary PZT lattice: a) over Curie temperature, b) below Curie temperature

Pjezokeraminės medžiagos tokios, kaip PZT gali būti tapatinamos su nevienalyte polikristaline sistema. Ją sudarantys kristalai priklauso nuo medžiagos formavimo sąlygų ir dažniausiai turi skirtingus matmenis, formą, o kartais net ir defektus kristalinėse gardelėse. Virš tam tikros temperatūros,

vadinamos Kiuri temperatūra (Kiuri tašku), šios medžiagos kristalai turi kubinės simetrijos struktūrą. Gardelės pavyzdys pavaizduotas 1.1a paveiksle. Ši struktūra yra simetrinė centro atžvilgiu. Neigiamo ir teigiamo krūvių centrai sutampa, todėl medžiagoje nėra jokių dipolių ir sakoma, kad medžiaga pasižymi paraelektrinėmis savybėmis. Kai medžiagos temperatūra yra žemesnė už Kiuri temperatūrą, kristalas įgauna tetragonalinės simetrijos struktūra, kur neigiamų ir teigiamo krūvių centrai nebesutampa (1.1b pav.). Todėl kiekviena elementarioji gardelė tampa elektriniu dipolių, kurio orientacija gali būti apversta į priešingą, arba orientuota išilgai užduoto elektrinio lauko. Šios medžiagos yra priskiriamos prie feroelektrinių, nes jų elektrinė elgsena turi fizikinę analogiją su feromagnetinėmis medžiagomis, pvz. poliarizacijos metu stebima histerezė, dielektrinė konstanta yra labai aukšta ir priklauso nuo temperatūros (Koch, 1988).

Dipolių orientacija medžiagos tūryje nėra atsitiktinė. Greta esantys dipoliai lygiuojasi ir formuoja sritis su lokaliomis lygiavimo kryptimis dar vadinamomis Vaiso (Weiss) domenais. Vaiso domene esantys dipoliai lygiuojasi bendra kryptimi, o dipolių momentų tinklas formuoja bendrą domeno momentą, t. y. domeno poliarizaciją (dipolio momentą tūrio vienetui) (Koch, 1988).

Kaimyninių Vaiso domenų poliarizacijos kryptys nėra atsitiktinės, nes šalia esančių domenų kryptys gali skirtis 90° arba 180°. Kadangi Vaiso domenų pasiskirstymas medžiagoje priklauso nuo susiformavusių kristalų dydžio ir formos, jis yra atsitiktinis. Dėl chaotiškos jų visumos, suminė keraminės struktūros poliarizacija yra lygi nuliui (1.2a pav.) (IMTL, 2005). Tai yra energetiškai naudinga polikristalinė būsena (Koch, 1988).



a) b) c)

1.2 pav. Pjezokeramikos dipolių orientacija: a) nepoliarizuotos, b) poliarizuojamos, c) poliarizuotos
Fig. 1.2. The orientation of domain of piezoceramic: a) prior to polarization, b) during polarization, c) polarized

Nepoliarizuota keramika yra izotropinė medžiaga, ir pjezoelektrinėmis savybėmis nepasižymi. Ją galima poliarizuoti bet kokia pasirinkta kryptimi. Tam

reikia keramikos bandinį žemesnėje nei Kiuri temperatūra paveikti stipriu, laisvai pasirinktos krypties, elektriniu lauku (1.2b pav.). Veikiami elektrinio lauko domenai išsilygiuoja išilgai elektrinio lauko linijų, o pats pjezokeramikos bandinys pailgėja lauko kryptimi. Išjungus elektrinį lauką ir atvėsinus bandinį, domenų dipoliai išlieka apytiksliai orientuoti poliarizacijos elektrinio lauko kryptimi (1.2c pav.). Dėl to pjezokeraminiame elemente išlieka likutinė, suminė poliarizacija ir pastovioji deformacija, kurios neišnyksta ir nebeveikiant elektriniam laukui, t. y. medžiaga tampa anizotropinė (Koch, 1988).

Elektrinis laukas E ir poliarizacija P dielektrinėje terpėje yra susiję sekančia išraiška:

$$\{D\} = \varepsilon_0\{E\} + \{P\}, \tag{1.1}$$

čia ε_0 elektrinė konstanta, D elektrinis poslinkis. Kaip bebūtų, tokiose feroelektrinėse medžiagose kaip PZT, P yra funkcija nuo E. Poliarizuojant feroelektrinės medžiagos elementus pastoviame elektriniame lauke, stebimas jų dielektrinių savybių netiesiškumas. Šį reiškinį atspindi dielektrinės histerezės kilpa (1.3a pav.) (Hemsel, 2001). Jei paimtume dar nepoliarizuotą PZT elementą ir žemesnėje nei Kiuri temperatūra pradėsime veikti didėjančiu elektriniu lauku, tai pjezoelektrinės medžiagos dipoliai pradės palaipsniui orientuotis pagal elektrinio lauko linijas. Šis etapas pavaizduotas kreive *AB* (1.3a pav.). Didinant elektrinio lauko stiprį galiausiai pasiekiamas tam tikras taškas *C*, kuri pasiekus poliarizacija nustoja augti: medžiagos dipolių orientacija sutampa su elektrinio lauko orientacija, t. y. medžiaga pasiekia soties poliarizacijos tašką P_{sat}.

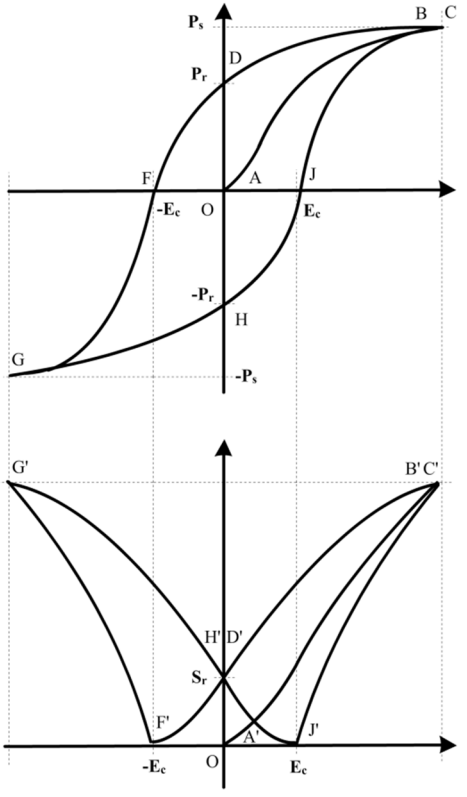
Išjungus elektrinį lauką, poliarizacijos vertė sumažėja iki taško *D*, medžiagos dipolių orientacija pasidaro ne tokia griežta. Dipoliai orientuojasi priklausomai nuo medžiagos kristalų tarpusavio išsidėstymo ir sąveikos, medžiagos struktūra pereina į labiau energetiškai naudingą būseną, bet dipolių orientacija negrįžta į pradinę padėtį. Feroelektrinėje medžiagoje išlieka likutinė poliarizacija P_r.

Jei didintume elektrinio lauko stiprį priešinga kryptimi, tai pasiekus tam tikrą elektrinio lauko stiprio vertę taške *F*, kitaip dar vadinama pasipriešinimo lauku E_c, poliarizacija taptų nuline. Toliau didinant elektrinį lauką iki taško *G*, pasiekiama priešingos krypties soties poliarizacija – P_{sat}. Jei ir vėl pakeistume lauko stiprio kryptį ir padidintume jį iki soties reikšmės E_{sat}, pasiektume poliarizacijos soties tašką *C* su poliarizacijos verte P_{sat}, ir t. t.

1.3a paveiksle apatinėje dalyje pavaizduota deformacijos *S* priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio *E*. Kaip parodyta pavyzdyje, deformacijos priklausomybės kreivė taip pat yra veikiama histerezės efekto, kaip ir poliarizacija *P*.

Kadangi bandinio tūris išlieka apytiksliai nepakitęs, santykinis deformacijos S_3 poliarizacijos kryptimi didėjimas (arba mažėjimas) yra lydimas bandinio

matmenų, statmenų poliarizacijos krypčiai santykiniam mažėjimui (arba didėjimui), kuris apytiksliai lygus pusei santykinės deformacijos S_3 pokyčio. Tas pats dėsningumas galioja spaudimo ir tempimo jėgoms.

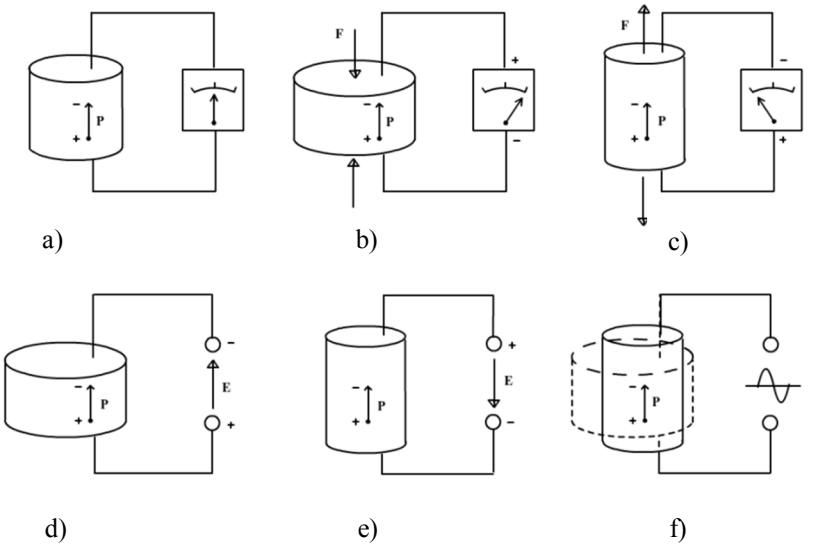


1.3 pav. Poliarizacijos histerezės kreivė (E_c – pasipriešinimo laukas, E_{sat} – soties laukas, P_{sat} – soties poliarizacija, P_r – liekamoji poliarizacija, Sr – liekamoji santykinė deformacija)

Fig. 1.3. The hysteresis curve of polarization (E_c – field resistance, E_{sat} – saturation field, P_{sat} – saturation polarization, P_r – residual polarization, S_r – residual relative deformation)

Tarkime, jog turime cilindro formos pjezoelektrinį keramikos elementą, kurio poliarizacijos ašis sutampa su cilindro ašimi, o galai padengti elektrodais (1.4a pav.). Jei cilindrą paveiktume jėga, kuri sukurtų medžiagoje tempimo ar gniuždymo įtempius, gauti dipolių momentų pakitimai sukurtų įtampą tarp dviejų cilindro paviršiuose susikaupusių krūvių. Jei cilindras būtų spaudžiamas,

tai susidariusi įtampa būtų to paties poliškumo kaip ir poliarizavimo įtampa, kuri buvo panaudota pjezoelektrinio cilindro poliarizavimui (1.4b pav.). Jei cilindras yra tempiamas, tai susidariusios įtampos poliškumas būtų priešingos krypties nei poliarizavimo įtampos (1.4b pav.). Šie pavyzdžiai vaizduoja generatoriaus veikimą t. y. mechaninės energijos virsmą elektrine energija.



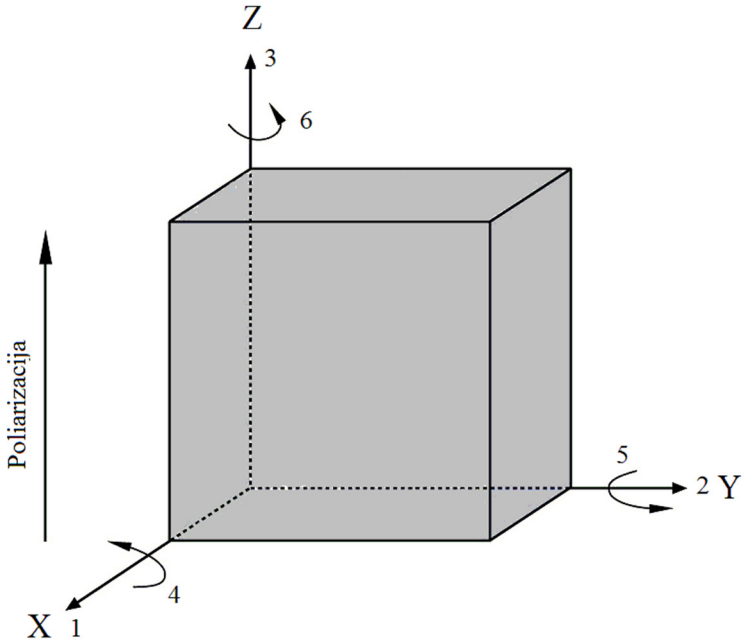
1.4 pav. Pjezoelektrinis efektas pjezoelektrinės keramikos cilindriniame kūne (Koch, 1988)
Fig. 1.4. The piezoelectric effect in a cylindrical body of piezoelectric ceramic

Jei elektrodus paveiksime įtampa priešingo poliškumo nei cilindro poliarizacija, cilindras susitrauks, o jei tokio pat poliškumo – cilindras pailgės. Tai variklio veikimo pavyzdžiai, kai elektrinė energija verčiama į mechaninę (Koch, 1988).

Nepoliarizuota keramika yra izotropinė medžiaga, todėl poliarizuojančio elektrinio lauko kryptis gali būti neapibrėžta. Tačiau poliarizuota pjezoelektrinė keramika yra anizotropinė medžiaga, ji turi griežtai apibrėžtą struktūrą, jos savybes apibūdinančios konstantos (elastingumas, dielektrinė skvarba, pjezoelektrinės konstantos ir kt.) turi matricinį pavidalą. Taip apibūdinamos trys kryptis t.y. kryptis sutampanti su poliarizacijos vektoriaus kryptimi ir dvi kryptys statmenos poliarizacijos vektoriui (Koch, 1988).

Pjezokeraminio elemento ašių orientacija yra nustatoma taip, kad Z ašies (pjezoašies) kryptis sutaptų su viena iš polinių ašių kryptimi, o kitos ašys X (optinė) ir Y (mechaninė) parenkamos pagal dešininę koordinačių sistemą

(1.3 pav.). Praktiškai nustatinėjant pjezoelemento ašis, pjezoašies kryptis sutapatinama su poliarizacijos vektoriaus kryptimi. Poliarizacijos metu vyksta ne tik pjezokeramikos struktūros perorientavimas, bet keičiasi ir jos mechaninės savybės. Heksogonalinės struktūros pjezokeraminė medžiaga paprastai laikoma izotropine plokštumoje xOy ir anizotropine plokštumose *xOz* ir *yOz* (1.3 pav.) (Tumasonienė, 2009).



1.5 pav. Pjezokeraminio elemento ašių orientacija (PI, 2008)
Fig. 1.5. The orientation of piezoelement axes

Dėl šios priežasties konstantos paprastai užrašomos su dviem indeksais, nurodančiais dydžio kryptį (t. y. įtempį ir deformaciją elastingumui; poslinkį ir elektrinio lauko stiprį dielektrinei skvarbai). Viršutinis indeksas naudojamas nurodyti dydį, kuris išlieka pastovus (Koch, 1988).

Dielektrinė skvarba apibrėžiama kaip medžiagos, veikiamos elektrinio lauko, gebėjimas poliarizuotis ir taip sumažinti arba padidinti elektrinį lauką pačioje medžiagoje. Dielektrinė skvarba nustato dielektrinę slinktį elektrinio lauko stiprio vienetui. Pirmas indeksas parodo dielektrinės slinkties kryptį, antras – elektrinio lauko kryptį. Pvz., ε_{11}^{T} dielektrinė skvarba esant pastoviam įtempimui, kai elektrinis laukas ir dielektrinė slinktis orientuotos statmenai poliarizacijos krypčiai; o ε_{33}^{S} dielektrinė skvarba esant pastoviai deformacijai,

kai elektrinis laukas ir dielektrinė slinktis orientuotos poliarizacijos kryptimi (Koch, 1988).

Medžiagos slankumas *s* apibrėžia deformaciją įtempio vienetui. Šis dydis yra atvirkštinis standumui. Pirmas indeksas parodo deformacijos kryptį, o antras – įtempio. Pvz., s_{11}^{E} slankumas esant pastoviam elektriniam laukui, kai deformacijos ir jos lydinčio įtempio kryptys sutampa ir yra orientuotos x-ašies kryptimi; s_{33}^{D} slankumas esant pastoviai dielektrinei slinkčiai, kai deformacijos ir jos lydinčio įtempimo kryptys sutampa ir yra orientuotos poliarizacijos kryptimi (Koch, 1988; Zhao, 2010).

Pjezoelektrinė deformacijos konstanta *d* apibūdina elektrinę poliarizaciją tenkančią mechaninio įtempimo vienetui. Kita vertus, tai deformacija, kurią patiria kūnas veikiamas elektrinio lauko stiprio vienetui. Pirmas indeksas nurodo medžiagoje generuojamos poliarizacijos kryptį (kai *E=0*) arba veikiančio elektrinio lauko kryptį. Antras indeksas nurodo veikiančio įtempio kryptį arba sukeltos deformacijos kryptį. Pvz., d_{33} tai vienetinio įtempio indukuota poliarizacija z-kryptimi. Kitaip tariant, tai vienetinio elektros lauko stiprio sukurta deformacija. d_{31} tai z-kryptimi orientuota poliarizacija sukelta x-kryptimi veikiančio įtempimo. Kitaip tariant, tai x-kryptimi orientuota deformacija sukelta z-krypties elektrinio lauko stiprio vieneto (Koch, 1988).

Pjezoelektrinė slėgio konstanta g apibūdina elektrinį lauką, sukurtą paveikus medžiagą mechaninio įtempio vienetui. Kitaip tariant, tai deformacija kuria patiria kūnas veikiamas dielektrinės slinkties vienetui. Pirmas indeksas nurodo medžiagoje generuojamo elektrinio lauko kryptį arba veikiančios dielektrinės slinkties kryptį. Antras indeksas atitinkamai nurodo veikiančio įtempimo kryptį arba sukeltos deformacijos kryptį. Pvz., g_{31} tai vienetinio įtempimo veikiančio x-kryptimi sukurtas elektrinis laukas z-kryptimi. Kitaip tariant, tai vienetinės dielektrinės slinkties z-kryptimi sukurta deformacija x-kryptimi. g_{15} tai x-kryptimi orientuotas elektrinis laukas, sukurtas šlyties įtempimo orientuoto apie y-ašį. Kitaip tariant, tai x-kryptimi orientuota šlyties deformacija sukelta apie y-kryptį orientuotos dielektrinės slinkties vieneto (Koch, 1988; Zhao, 2010).

Normaliomis darbo sąlygomis poliarizuotoje keramikoje ir pjezoelektriniuose kristaluose egzistuoja tiesinės priklausomybės tarp tamprumo ir deformacijos komponenčių, taip pat tarp elektrinio lauko ir elektrinės indukcijos komponenčių. Šios tiesinės priklausomybės išreiškiamos konstantomis, užrašytomis matriciniame pavidale, kurios įeina į priklausomybes, perteikiančias įmanomus pjezoelektrinių struktūrų elektromechaninius ryšius (Bubulis, et al., 2008; Zhao, 2010). Pjezoelektrines lygtis galima užrašyti sekančiu būdu:

$$\begin{aligned} \{S\} &= [s^{E}]\{T\} + [d]_{t}\{E\}, \\ \{D\} &= [d]\{T\} + [\varepsilon^{T}]\{E\}. \end{aligned} \tag{1.2}$$

Pirmąja lygtimi aprašomas atvirkštinis pjezoefektas, antrąja - tiesioginis pjezoefektas. Čia: S – tamprioji deformacija (santykinis pailgėjimas); T – įtempimai; E – elektrinis lauko stipris; D – dielektrinė slinktis.

Indeksas t reiškia transponuotą matricą, viršuje užrašyti indeksai rodo, kurie dydžiai laikomi pastoviais – E, T

Lygčių sistema (1.2) yra viena iš keturių galimų pjezoefekto išraiškos formų. Tačiau šiame darbe naudosime būtent tokią išraišką, nes ji yra priimtiniausia mechatronikos analizės atžvilgiu.

Poliarizuota keramika pastoviame elektriniame lauke, tampa dvikrypte izotropine medžiaga poliarizacijos krypčiai statmenoje plokštumoje. Tada dielektrinius, tamprumo ir pjezoelektrinius ryšius galima pavaizduoti matriciniame pavidale ir keramika suklasifikuoti kristalografiškai. Simetrinės keramikos priklausomybės yra tokios pačios, kaip ir šešiakampių poliarizuotų kristalų klasės. Kadangi visos PZT ir $BaTiO_3$ keraminės medžiagos poliarizuotoje būsenoje priklauso 4 mm arba 6 mm kristalų klasėms, iš šios priklausomybės gaunamos nepriklausomos 5 tamprumo (pasiduodamumo), 3 pjezoelektrinės ir 2 dielektrinės pamatinės konstantos nelygios 0 (Bubulis, et al., 2008; Zhao, 2010; Джагупов, et al., 1986).

Atsižvelgiant į pjezokeraminės medžiagos anizotropines savybes, pjezoelektrinių deformacijų matrica bendru atveju turi tokią išraišką (Zhao, 2010):

$$[\mathrm{d}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{d}_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathrm{d}_{15} & 0 & 0 \\ \mathrm{d}_{31} & \mathrm{d}_{31} & \mathrm{d}_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{1.3}$$

Esant pastoviam elektrinio lauko stiprumui, o poliarizacijos vektoriaus krypčiai nukreiptai išilgai z-ašies kaip parodyta 1.5 paveiksle, pjezokeitiklio pasiduodamumo matrica užrašoma taip (Zhao, 2010):

$$\left[\mathrm{s}^{\mathrm{E}}\right] = \begin{bmatrix} \mathrm{s}_{11}^{\mathrm{E}} & \mathrm{s}_{12}^{\mathrm{E}} & \mathrm{s}_{13}^{\mathrm{E}} & 0 & 0 & 0 \\ \mathrm{s}_{12}^{\mathrm{E}} & \mathrm{s}_{11}^{\mathrm{E}} & \mathrm{s}_{23}^{\mathrm{E}} & 0 & 0 & 0 \\ \mathrm{s}_{13}^{\mathrm{E}} & \mathrm{s}_{23}^{\mathrm{E}} & \mathrm{s}_{33}^{\mathrm{E}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathrm{s}_{44}^{\mathrm{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{s}_{44}^{\mathrm{E}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\left(\mathrm{s}_{11}^{\mathrm{E}} - \mathrm{s}_{12}^{\mathrm{E}}\right) \end{bmatrix}. \tag{1.4}$$

Pjezoelektrinės medžiagos dielektrinių konstantų matricos išraiška bendruoju atveju turi tokią formą (Zhao, 2010):

$$\left[\varepsilon^{T}\right] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^{T} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^{T} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^{T} \end{bmatrix}. \tag{1.5}$$

Jutikliams naudojamų pjezokeraminių medžiagų svarbiausia savybė yra pjezojautrumas. Šią charakteristiką apibūdina pjezoelektrinis įtempių koeficientas:

$$[d] = [\varepsilon^T][g], \tag{1.6}$$

čia [g] – elektrinio įtempių koeficientų matrica, o [ε^T] – dielektrinių konstantų matrica, kai yra pastovūs mechaniniai įtempimai. Ji parodo elektrinio signalo, ateinančio nuo keitiklio elektrodų, stiprumą, tuo pačiu metu naudojant jį padėties, greičio ir jėgos dydžio matavimams (Джагупов, et al., 1986).

Pjezoelektrinius keitiklius galima žadinti dvejais skirtingais būdais: statiniu arba periodiniu.

Statiniam sužadinimui taikomas tiesioginis arba atvirkštinis pjezoefektas. Tiesioginis pjezoelektrinis efektas statiškai gali būti tiriamas dideliame apkrovų diapazone. Esant didesnėm apkrovom stebimi didesni nuokrypiai, kurie paaiškinami pjezoelektrinės keramikos elgsena ir gali būti įvertinti tiesioginiu pjezoelektriniu efektu. Tiesioginio pjezoelektrinio efekto įvertinimas matuojant yra sudėtingesnis dėl keramikos izoliacinės varžos, kuri gali siekti nuo kelių šimtų iki kelių tūkstančių megaomų, ir kartu su savuoju pjezoelektrinės keramikos talpiu, sukuria tam tikrą laiko konstantą (Higuchi, et al., 1988).

Periodinis žadinimas taikomas dažniau nei statinis. Elektrinio žadinimo atveju, elektrinis impedansas dažniausiai gali būti vertinamas kaip vien talpinis. Deformacijos yra tiesiogiai proporcingos pridedamoms įtampoms. Dinaminio žadinimo atveju, pjezoelektriniai elementai žadinami kintamu tam tikro dažnio elektriniu lauku. Tokios mechaninės virpančios sistemos gali būti nagrinėjamos pagal ekvivalentinę schemą pateikta 1.6 paveiksle (Bubulis, et al., 2008; Zhao, 2010).

Ši schema apibūdinama keturiais pagrindiniais parametrais: C_0 – normalioji elektrinė talpa; C_1 – dinaminė talpa, kuri gaunama iš tampriųjų deformacijų; L_1 – įvertinta mechaninė virpančiosios sistemos inercija; R_1 – nuostolių varža, lemiama vidinės virpančiosios sistemos trintimi. Tokios sistemos tariamasis laidumas gali būti apibrėžtas kaip:

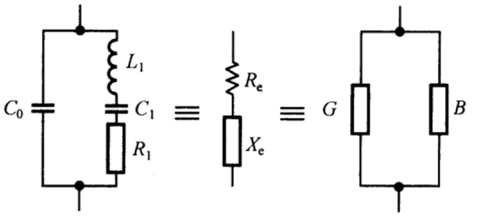
$$Y = i\omega C_0 + \frac{1}{R_1 + i\omega L_1 + \frac{1}{i\omega C_1}} = Y_0 + Y_d = G + iB, \tag{1.7a}$$

čia Y_0 ir Y_d atitinkamai statinis ir dinaminis tariamasis laidumas. G ir B tai realioji ir menamoji tariamojo laidumo dalys.

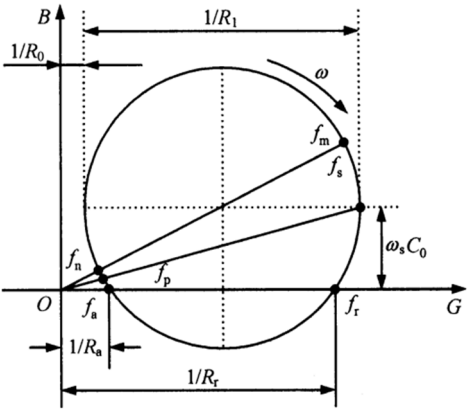
Ekvivalentinės grandinės tariamoji varža gali būti apibrėžta kaip:

$$Z = \frac{1}{y} = \frac{i}{\omega C_0} \cdot \frac{\Omega - i\delta}{1 - \Omega + i\delta} = R_e + i\mathrm{X}_e, \tag{1.7b}$$

čia R_e ir X_e realioji ir menamoji tariamosios varžos dalys. $\Omega = \frac{f^2 - f_s^2}{f_p^2 - f_s^2}$ normalizuotas dažnių faktorius; $\delta = 2\pi / C_0 R$ normalizuotas slopinimo faktorius. f_s ir f_p nuoseklaus ir lygiagretaus rezonansų dažniai (1.7 ir 1.8 pav.).



1.6 pav. Pjezoelektrinio keitiklio ekvivalentinė elektrinė grandinė (Zhao, 2010)
Fig. 1.6. Equivalent circuit of the piezoelectric actuator



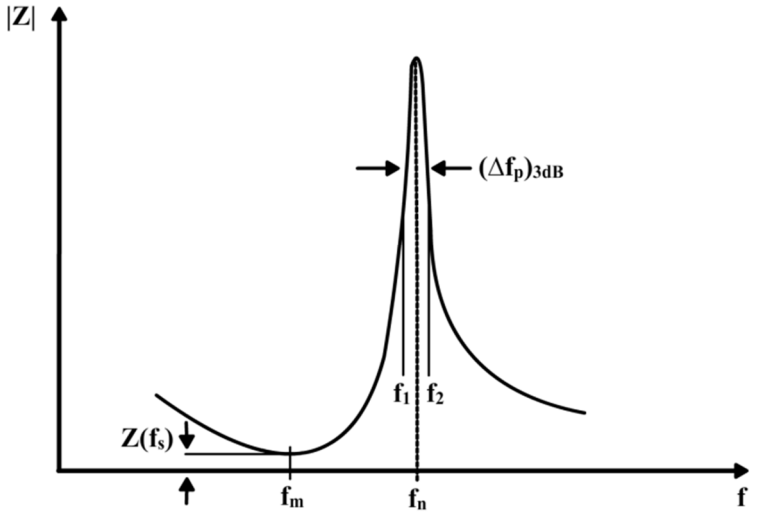
1.7 pav. Tariamojo laidumo kilpos diagrama (Zhao, 2010)
Fig. 1.7. Diagram of admittance circle

Pasinaudojus elektrinės grandinės analogija, galima gauti išraiškas, nusakančias ryšius tarp elektrinių ir mechaninių dedamųjų:

$$F = Z_m v - kU. \tag{1.8a}$$

$$I = kv + Y_0 U. \tag{1.8b}$$

čia U ir I tai elektrinės grandies įtampa ir srovės stipris, o F ir v mechaninės grandies jėga ir greitis. Koeficientas k, tai pjezoelektrinio komponento jėgos koeficientas, o Z_m keitiklio mechaninis impedansas (Zhao, 2010; Hemsel, 2001).



1.8 pav. Tariamosios varžos laidumo kilpos diagrama (Koch, 1988)
Fig. 1.8. Impedance as function of frequency

Veikiant pjezoelektrinį elementą išorinėmis mechaninėmis apkrovomis, dalis mechaninės energijos pereina į akumuliuojamą elemente elektrinę energiją. Šį procesą apibūdina elektromechaninis ryšio koeficientas (Pluzhnikov, et al., 1986).

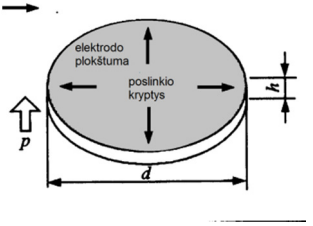
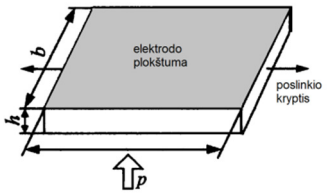
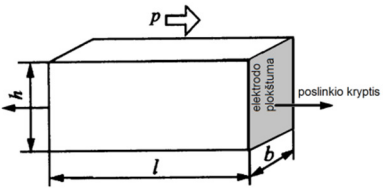
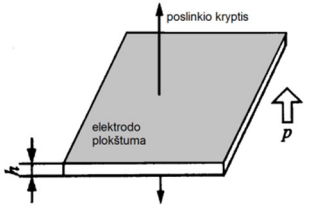
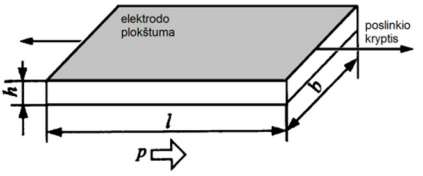
Bendruoju atveju elektromechaninio ryšio koeficientą galime išreikšti taip:

$$k = \frac{W_{12}}{\sqrt{W_1 W_2}}, \tag{1.9}$$

čia k – elektromechaninio ryšio koeficientas, W_1 – tamprumo energijos tankis tūrio vienetui, W_2 – dielektrinės energijos tankis tūrio vienetui, o W_{12} – pjezoelektrinės energijos tankis tūrio vienetui. Šis koeficientas parodo pjezokeitiklio darbo efektyvumą, todėl natūralu, kad projektuojant pjezokeitiklius, parenkamos pjezokeraminės medžiagos, turinčios dideles elektromechaninio koeficiento reikšmes (Bubulis, et al., 2008; Zhao, 2010).

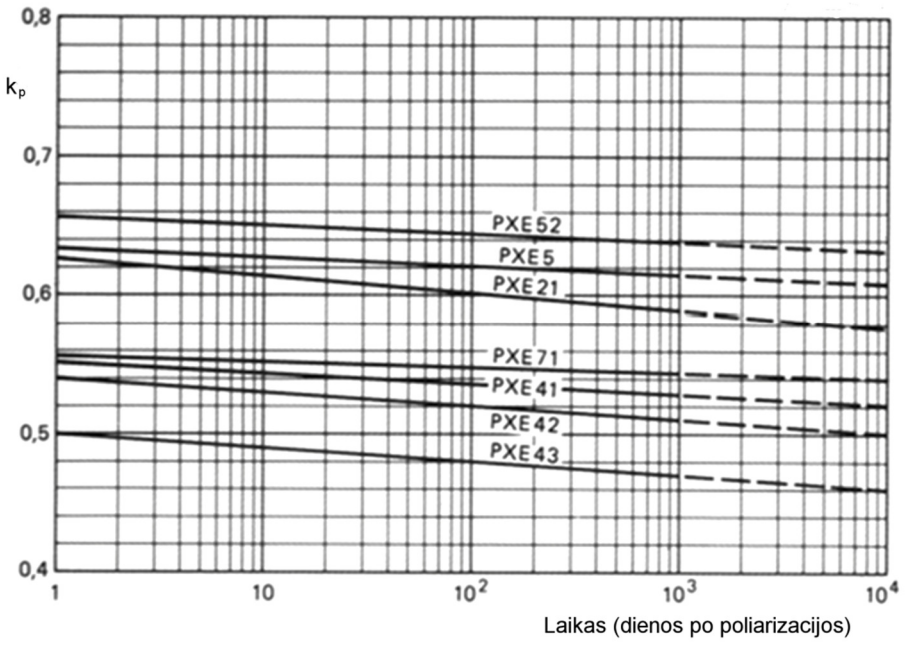
Analizuojant pjezokeitiklių pagrindines charakteristikas, kurios surištos su pjezokeraminės medžiagos savybėmis, buvo laikoma, kad pjezoefekto reiškinys aprašomas kaip tiesinė sistema. Todėl, pagrindinė lygčių sistema, aprašanti pjezoelektrinius procesus (1.3), galioja tik esant mažiems fizikinių dydžių pokyčiams.

1.1 lentelė. Elektromechaninio ryšio koeficientai skirtingiems pjezokeitikliams
Table 1.1. Electromechanical coupling coefficients of piezoelectric vibrators

Formų/svyravimų tipų pavyzdžiai	Elektromechaninio ryšio koeficientai
	$k_p^2 = \frac{2}{1-\sigma}\frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T}$
	$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T}$
	$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \varepsilon_{33}^T}$
	$k_t^2 = \frac{e_{33}^2}{c_{33}^D \varepsilon_{33}^S}$
	$k_t^2 = \frac{e_{15}^2}{c_{33}^D \varepsilon_{11}^S}$

Nors atskirais atvejais gali būti taikoma ir apibūdinant kvazitiesinę sistemą su kintamais koeficientais. Norint aprašyti realiai egzistuojančias netiesines

pjezoelektrinio efekto savybes, reikia atlikti papildomą reiškinio analizę (Bubulis, et al., 2008; Zhao, 2010).

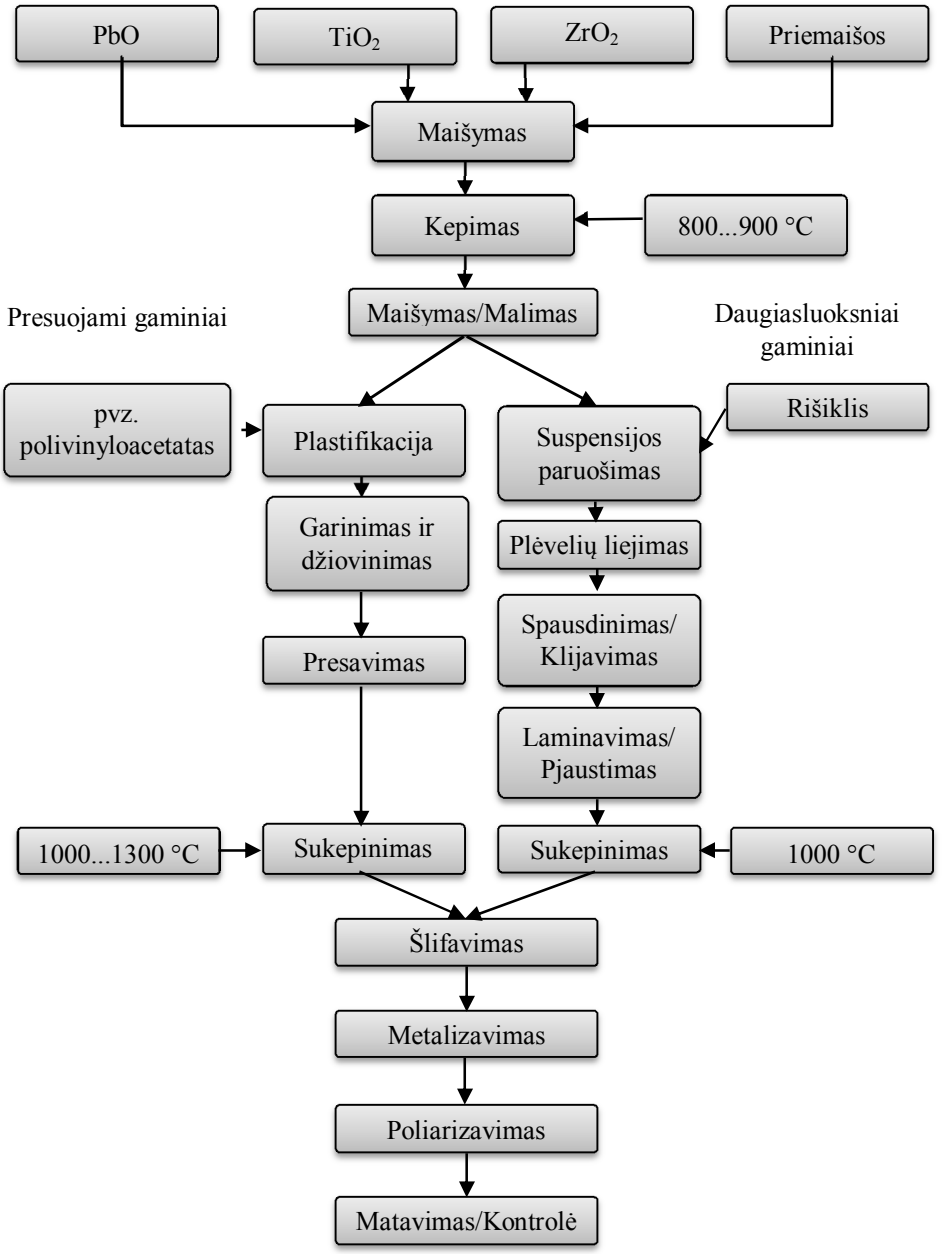


1.9 pav. Senėjimas skirtingoms pjezoelektrinėms medžiagoms (PI Ceramics 2008)
Fig. 1.9. Aging of some piezoelectric materials

Pjezoelektrinių elementų savybės yra priklausomos nuo temperatūros ir laiko. Ypač svarbi stabilumo funkcijos išraiška, jos priklausomybė nuo laiko (1.9 pav.). Grafikas rodo, kad didžiausias poliarizacijos mažėjimas įvyksta per pirmus tris mėnesius nuo medžiagos poliarizacijos, o vėliau mažėja nesmarkiai. Galime teigti, kad pjezomedžiagos ilgoje perspektyvoje yra stabilios poliarizacijos.

1.2. Pjezokeraminių komponentų konstrukcijos

Pjezokeramikos gamyba – daugiapakopis ir sudėtingas procesas. Pasaulyje gaminamų pjezokeraminių elementų produkcija priklauso nuo cheminių elementų sudėties, modifikatorių ir gamybos technologijų ypatumų.



1.10 pav. Pjezokeramikos gamybos technologijos schema (CeramTec, 2011)
Fig. 1.10. Scheme of manufacturing technology of piezoceramic

Kiekvienas gamintojas, tokie kaip „Ferroperm Ceramics A/S“ (Danija), „Noliac A/S“ (Danija), „Sparkler Ceramics Pvt. Ltd.“ (Indija), „APC International, Ltd.“ (JAV), „ELPA“ (Rusija), „PI Ceramic GmbH“ (Vokietija) siūlo savo pjezoelektrinių komponentų rinkinį, kurių atskiri elementai turi optimalią konstrukciją priklausomai nuo paskirties. Nepaisant galimo pjezomedžiagų, jų komponentų ir naudojamos gamybos technologijos įvairumo, visą gamybos procesą galima pavaizduoti apibendrinta schema (1.10 pav.).

Daugiamačių pjezokeitiklių rezonansinių virpesių parametrai priklauso nuo konstrukcinių charakteristikų, kurias būtų galima suskirstyti į grupes, apibrėžiančias geometrinius parametrus: formą (charakteringų matmenų santykį), kraštines sąlygas bei žadinimo zonų konfigūraciją (elektrodų formą, plotą, topologiją) (Ragulskis, et al., 1988; Zhao, 2010).

Geometrinių parametrų įtaka daugiamačių pjezokeitiklių virpesiams panaši į bet kurios kontinuumo sistemos. Bendru atveju skirtingų geometrinių formų pjezokeitikliuose žadinami skirtingų parametrų virpesiai. Nors kai kuriais atvejais tas pačias virpesių charakteristikas galima gauti naudojant skirtingos geometrijos pjezokeitiklius. Vadinasi, parenkant daugiamačių pjezokeitiklių geometrinius parametrus, reikia atsižvelgti ir į tokias charakteristikas kaip pjezokeitiklio savųjų dažnių tankį, dominuojančius virpesius, pereinamų procesų trukmę, generatoriaus parametrus, konstrukcinius sistemos ypatumus. Didelę įtaką pjezokeitiklio virpesiams turi keitiklio charakteringų geometrinių matmenų santykiai, pavyzdžiui, strypo ilgio ir pločio santykis, cilindro sienelės storio ir vidinio spindulio santykis ir t. t. Būtent šie dydžiai apibrėžia pjezokeitiklio savųjų formų eiliškumą, kuris kinta, pasikeitus matmenų santykiui.

Vibraciniuose įrenginiuose naudojami įvairių geometrinių formų pjezokeitikliai. Paprasčiausi iš jų yra stačiakampės plokštelės, strypai, juostos, sukimosi kūnai – žiedai, diskai, cilindrai, sferos (1.11 pav.). Galimi ir specialių formų – trikampiai, pusiau sferos – bei sudėtiniai elementai: daugiasluoksniai su prijungtomis masėmis ir be jų. Pjezokeitiklių įtempimų koncentracijos sumažinimui vibrosmūgių metu, galimos ir įvairios, energetiškai optimalios geometrinės formos, pavyzdžiui laiptuotos formos pjezokeitiklis su skerspjūvio mažėjimu keitiklio kontakto vietos link. Siekiant padidinti deformacijų amplitudes, pjezokeitikliai gaminami koncentratorių formos. Koncentratorių konstrukcijas sąlyginai galima būtų suskirstyti į turinčias deformacijų ir rezonansines greičio formas.

Elektrodų išdėstymo forma, plotas ir topologija yra vienas svarbesnių pjezokeitiklių konstrukcinių charakteristikų. Varijuojant elektrodų geometrine forma ir išdėstymo vietomis bei keičiant žadinimo įtampos fazę, gaunami skirtingi pjezokeitiklio virpesių tikriniai dažniai bei formos. Parinkus atitinkamas elektrodų išdėstymo vietas ir formas bei sumuojant lyginių dažnių harmonikas, generuojami ir asimetrinių ciklų virpesiai. Kiekvienos harmonikos

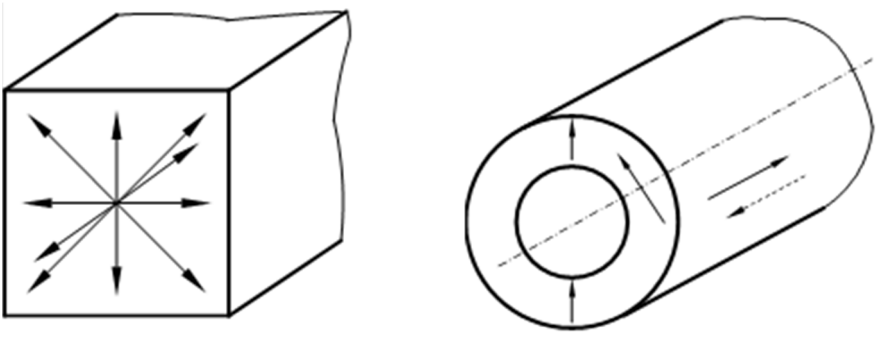
svyravimų amplitudės yra parenkamos keičiant elektrodų plotą arba žadinimo įtampos amplitudę. Nustačius optimalią pjezokeitiklio elektrodų konfigūraciją, galima sumažinti pjezokeitiklio įtempimų lauką, nuovargį bei padidinti įrenginio ilgaamžiškumą (Ragulskis, et al., 1988).



1.11 pav. Pagrindinės pjezokeitiklių konstrukcijos: diskai, stačiakampės plokštelės, cilindrai, strypai, žiedai (PI Ceramic , 2011)
Fig. 1.11. The main components of piezoceramic: discs, square plates, cylinders, beams, rings

Poliarizacijos vektoriaus kryptis taip pat įtakoja keitiklio mechaninių virpesių lauką. Paprastai pjezokeitiklio poliarizacija būna lygiagreti arba statmena elektrodų išdėstymo plokštumai. Bet galimas atvejis, kai sudėtingų daugiakomponenčių virpesių žadinimui naudojamas kintamas poliarizacijos vektorius, t. y. skirtingose pjezokeitiklio vietose vektoriaus kryptis skiriasi. Tuo atveju galima generuoti trimates kinematinės poros judesio trajektorijas, nesinusoidinius virpesius ir t. t. 1.12 paveiksle rodyklėmis pavaizduotos pradinės poliarizacijos kryptys strypiniame (Ragulskis, et al., 1988) ir cilindro formos pjezokeitikliuose (Джагупов, et al., 1986). Daugiamatė poliarizacija koordinačių ašių atžvilgiu, taip pat pilno arba dalinio poliarizacijos ciklo panaudojimas, didina pjezomodulių kitimo intervalą ir išplečia pjezokeitiklio funkcines galimybes.

Analizuojant pjezokeitiklių virpesius, atsižvelgiama ir į elektrines bei mechanines kraštines sąlygas. Žadinančio elektrinio lauko ir mechaninių deformacijų (poslinkių) vektorių tarpusavio orientacija apibrėžia elektrines kraštines sąlygas virpesių kryptims. Pjezokeitiklio mechanines kraštines sąlygas nusako pjezokeitiklio tvirtinimo taškai ir sąlygos.



a) b)

1.12 pav. Naudojamos pjezokeitiklių poliarizacijos vektoriaus kryptys:
a) strype; b) cilindre (Ragulskis, et al., 1988)
Fig. 1.12. Usable directions of polarization vektor of piezoactuators:
a) in beam; b) in cylinder

Keičiant visus aukščiau paminėtus parametrus, įtakojančius pjezokeitiklio virpesių žadinimą, galima generuoti sudėtingus erdvinius judesius, slopinti pašalinius ir sustiprinti reikiamus virpesių tipus.

1.3. Pjezoelektrinių keitiklių konstrukcijos ir jų taikymas

Didelė pjezokeitiklio savybių įvairovė leidžia sukurti daug pjezokeitiklio konstrukcijų variantų. Pagal konstrukciją pjezoelektrinius keitiklius galima būtų klasifikuoti į sekančias grupes:

1. Disko arba žiedo formos keitikliai. Tokio tipo keitikliuose taikomi šie virpesiai:

a) lenkimo virpesiai, sklindantys statmena paviršiui kryptimi, kur išnaudojamos dvi tokio pat tipo rezonansinės virpesių formos;

b) radialiniai virpesiai, sklindantys horizontaliame paviršiuje, kur yra išnaudojami tų pačių formų rezonansiniai virpesiai;

c) radialiniai ir lenkimo virpesiai, sklindantys horizontaliame paviršiuje, kur išnaudojamos skirtingų virpesių formos.

2. Strypo formos keitikliai. Šiose sistemose naudojami virpesiai:

a) lenkimo virpesiai, išnaudojant tokio pat tipo rezonansines virpesių formas;

b) išilginiai ir sukimo virpesiai, panaudojant skirtingų formų rezonansinius virpesius;

c) išilginiai – lenkimo.

3. Plonos stačiakampio formos plokštelės keitikliai. Šiuose keitikliuose naudojami virpesiai:

a) išilginiai ir lenkimo virpesiai, gaunami išnaudojant skirtingų formų tikrinius virpesius;

b) lenkimo virpesiai, gaunami išnaudojant tokias pat arba skirtingas tikrinių virpesių formas.

Kuriant pjezoelektrinius keitiklius svarbu, kokiu būdu formuojamas elipsinis, keitiklio taško, judesys. Keitiklių konstrukcijas galima skirstyti atsižvelgiant į elipsinio judesio sukūrimo būdus:

1. Keitikliai, kuriose sužadinami vienos formos rezonansiniai virpesiai. Šio tipo keitikliai priklauso pradinių sistemų grupei. Šių sistemų trūkumas yra tas, kad dėl konstrukcijos apribojimų sunkiai realizuojamas reversinis judesys. Tačiau jos pranašesnės už kitas dėl to, kad gali veikti naudodamos vienos fazės maitinimo šaltinį ir suteikti didelį sukimo momentą bei stabilų judesį kūnui, sąveikaujančiam su ja.

2. Keitiklių sistema, kurią sudaro keli nepriklausomai veikiantys keitikliai, turintys vienodą tikrinį dažnį.

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

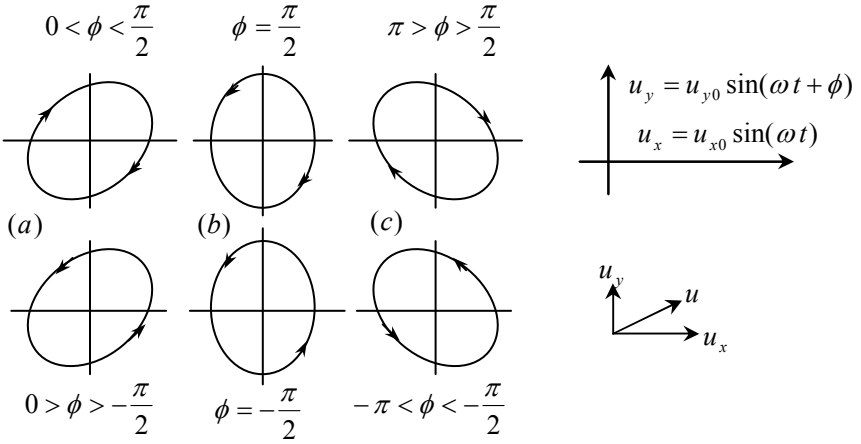
1.3.1. Elipsinės trajektorijos formavimas pjezoelektriniais keitikliais

Pjezoelektrinio keitiklio išėjimo grandies taškų elipsės trajektorija yra aprašoma poslinkiais. Judėjimas elipsės trajektorija galimas tik esant fazių skirtumui ($\phi \neq 0$) tarp u_x ir u_y poslinkių (1.13 pav.). Tuo atveju, kai kampas tarp fazių lygus nuliui ($\phi = 0$), gaunamas linijinis judėjimas.

Judėjimas elipse pjezoelektrinio keitiklio 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 pjezoelektriniai keitikliai generuojantys virpesius pasitelkdami vieną iš dviejų principų: stovinčios bangos ir bėgančios bangos.



1.13 pav. Pjezokeitiklio išėjimo grandies elipsinės trajektorijos formavimas
Fig. 1.13. Formation of elliptical trajectory of pjezoactuator output link

Stovinti banga išreiškiama:

$$u_s(x,t) = A\cos kx\cos\omega t\,, \tag{1.14}$$

o bėganti banga išreiškiama:

$$u_b(x,t) = A\cos(kx-\omega t). \tag{1.15}$$

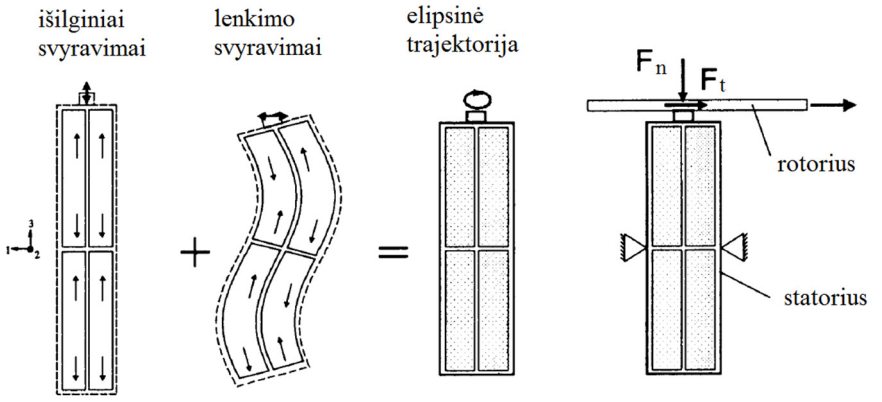
Naudojant kampų skirtumo kosinuso išraišką, lygtį (1.15) galime pakeisti į:

$$u_b(x,t) = A\cos kx\cos\omega t + A\cos\left(kx-\frac{\pi}{2}\right)\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right). \tag{1.16}$$

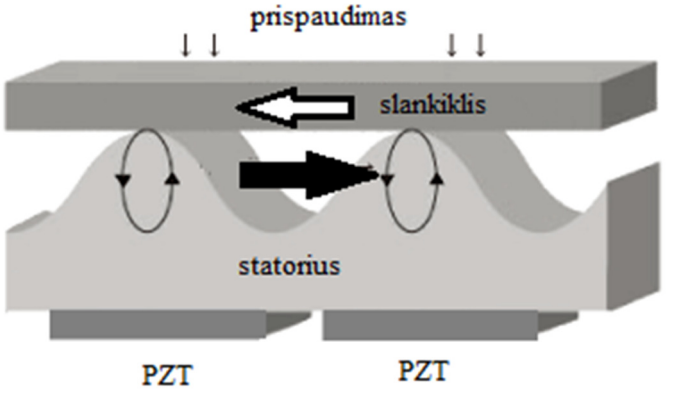
Tai leidžia daryti išvadą, kad bėgančią bangą galima sužadinti sudedant dvi stovičias bangas, kurių fazė skiriasi $\pi/2$ tiek laiko, tiek erdvės atžvilgiu. Šis principas būtinas, norint sužadinti stovinčią bangą riboto dydžio medžiagos paviršiuje, nes riboto dydžio standžioje terpėje galima sužadinti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

Vienas iš paprasčiausių pjezoelektrinių keitiklių veikiančių stovinčios bangos principu buvo sukurtas 1976 m. (1.14 pav.) (Вишневский, 1976).

Kontaktinio taško trajektorija formuojama panaudojus išilginių ir skersinių virpesių formų superpoziciją.



1.14 pav. Ultragarsinis variklis su stovinčios bangos keitikliu
Fig. 1.14. Ultrasonic motor with standing-wave actuator



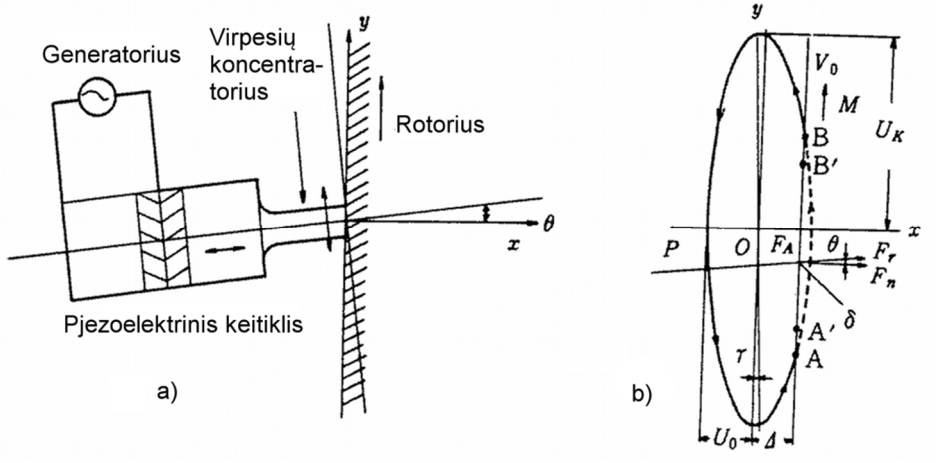
1.15 pav. Ultragarsinis variklis su bėgančios bangos keitikliu
Fig. 1.15. Ultrasonic motor with traveling-wave actuator

1.15 paveiksle pateikiama principinė ultragarsinio variklio, veikiančio bėgančios bangos principu schema. Šiuo atveju statoriaus paviršiuje formuojama bėganti banga žadinant pjezoelektrinius keitiklius su 90° fazės skirtumu. Gauta

bėganti banga slenka iš kairės į dešinę, o slankiklis stumiamas priešinga kryptimi, t. y. iš dešinės į kairę (Technohands Co. Ltd., 2010).

1.3.2. Stovinčios bangos tipo pjezoelektriniai keitikliai ir jų taikymas

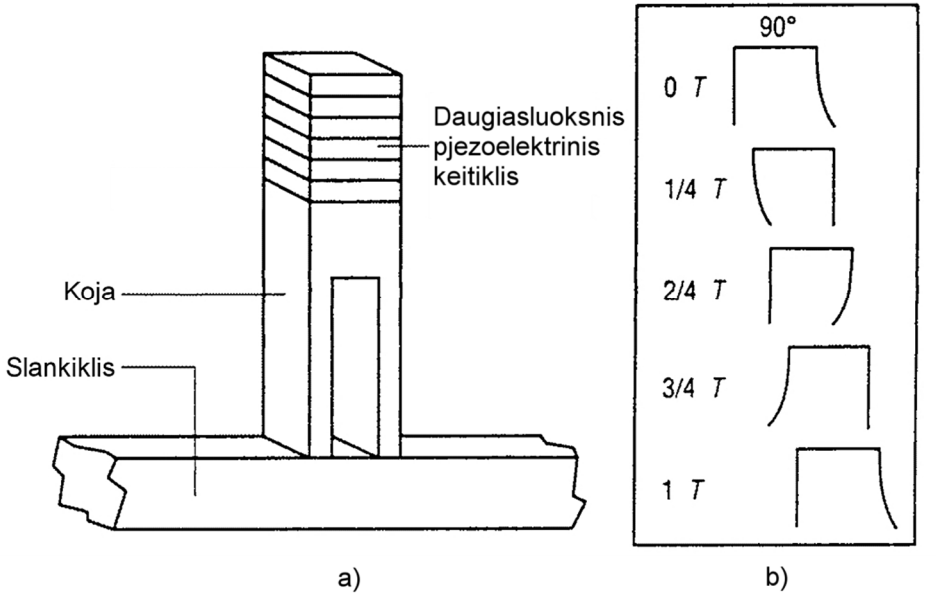
Stovinti banga dar vadinama vibruojančios jungties arba mažo smūgio tipo banga, kai vibruojanti dalis sujungta su pjezoelektriniu elementu o pjezoelemento kontaktinis taškas sukelia plokščius elipsinius judesius. 1.16 paveiksle. parodytas T. Sashida sukurtas paprasčiausias linijinio vibracinio variklio modelis. Vibruojanti dalis yra priglausta prie išėjimo grandies nuožulniu kampu θ. Kai pjezoelektriniame keitiklyje sužadinamas poslinkis, vibruojanti dalis sukelia lenkimą dėl išėjimo grandies sukeliamo ribojimo, kai vibruojančios dalies kontaktinis taškas juda paviršiumi tarp A ir B, ir juda laisvai tarp B ir A. Jei vibruojanti dalis ir pjezoelementas tinkamai suderinti, jie sudaro rezonuojančią sistemą ir gaunamas kontaktinio taško elipsinis judesys.



1.16 pav. Stovinčios bangos tipo variklis: a) sandaros schema ir b) jo kontakto padėtis
Fig. 1.16. Vibratory coupled type motor: a) schemeof structure and b) its tip locus

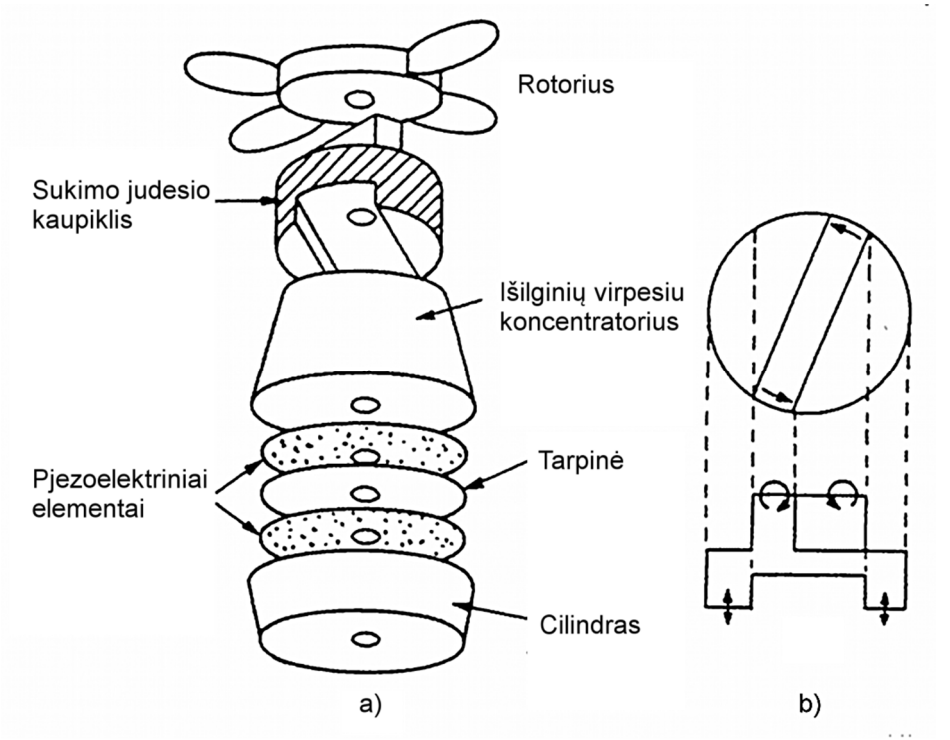
Todėl, tik atkarpoje A→B trintimi perduodamas judesys į išėjimo grandį ir taip sukūriamas sukimo momentas arba trauka. Dėl išėjimo grandies inercijos sukimosi greičio pulsavimas nėra didelis. Stovinčios bangos panaudojimas ultragarsiniame variklyje yra ekonomiškas ir pasižymi dideliu efektyvumu (teoriškai iki 98%), tačiau keitikliui virpant tikriniu dažniu, sudėtinga valdyti virpesių amplitudines ir fazines charakteristikas.

Įmonė „Uchino“ (Uchino, 1988) išrado π formos linijinį variklį, kuris turi daugiasluoksnį pjezokeraminį elementą ir π formos metalines kojeles (1.17 pav.). Tarp dviejų kojelių mechaninio rezonansinio dažnio skirtumas yra nedidelis, o fazių skirtumą tarp abiejų kojelių vibracijų galima reguliuoti, keičiant pjezokeraminio elemento dažnį.



1.17 pav. π-formos linijinis ultragarsinis variklis: a) konstrukcija ir b) veikimo principas
Fig. 1.17. π-shaped linear ultrasonic motor: a) costruction and b) walking principle

Stovinčios bangos sukimosi variklis sukurtas T. Sashida pateikiamas 1.18 paveiksle. Ant cilindrinio vibratoriaus krašto paviršiaus įmontuotos ir prispaustos prie rotoriaus keturios vibruojančios dalys. Tai buvo vienas iš variklių prototipų, kurie sukėlė aktyvią ultragarsinių variklių plėtrą. 1500 aps./min. sukimosi greitis, 0,08 N/m sukimo momentas ir 12 W (40% efektyvumo) našumas buvo pasiekti tiekiant 30 W, prie 35 kHz dažnio. Šis ultragarsinių variklių tipas pasižymi daug didesniu greičiu nei žingsniniai varikliai, dėl aukšto veikimo dažnio ir didesnio virpesių poslinkio, esant tikriniam dažniui.

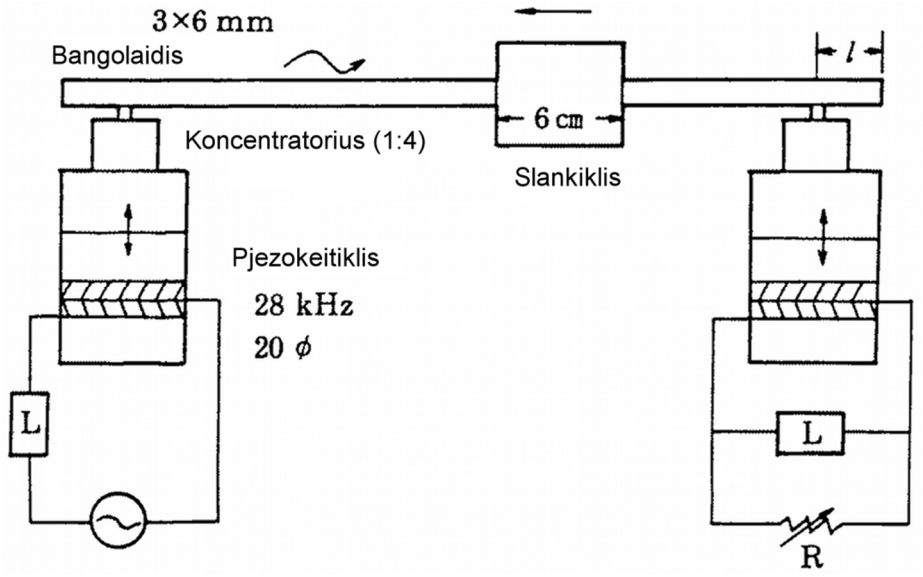


1.18 pav. Sukamųjų virpesių ultragarsinis variklis: a) sandaros schema ir b) sukamojo judesio kaupiklio judesys
Fig. 1.18. Torsional coupled ultrasonic motor: a) scheme of structure and b) the motion of the coupler

„Hitachi Maxel“ patobulino pastarąjį modelį pakeitę vibruojančią dalį besisukančia ir padidinę spaudimo jėgą (1.18b pav.). Sraigtinį virpesių kaupiklį sudaro figurinė įvorė, kurios atramos virpa išilginių virpesių režimu, o atramoje, kontaktuojačioje su rotoriumi, sužadinami sraigtiniai virpesiai, kurie perduoda sukimosi momentą, Vis dėlto, šie varikliai gali sukurti sukimąsi tik viena kryptimi, bet sukimosi judesys visada išlieka sklandus.

1.3.3. Bėgančios bangos tipo pjezoelektriniai keitikliai ir jų taikymas

Bėgančios bangos vibracinio variklio schema pateikiama 1.19 paveiksle. Ant dviejų strypo formos plieninių bangolaidžių įrengti du pjezoelektriniai vibratoriai, kur vienas sužadina, o kitas priima bėgančią bangą.



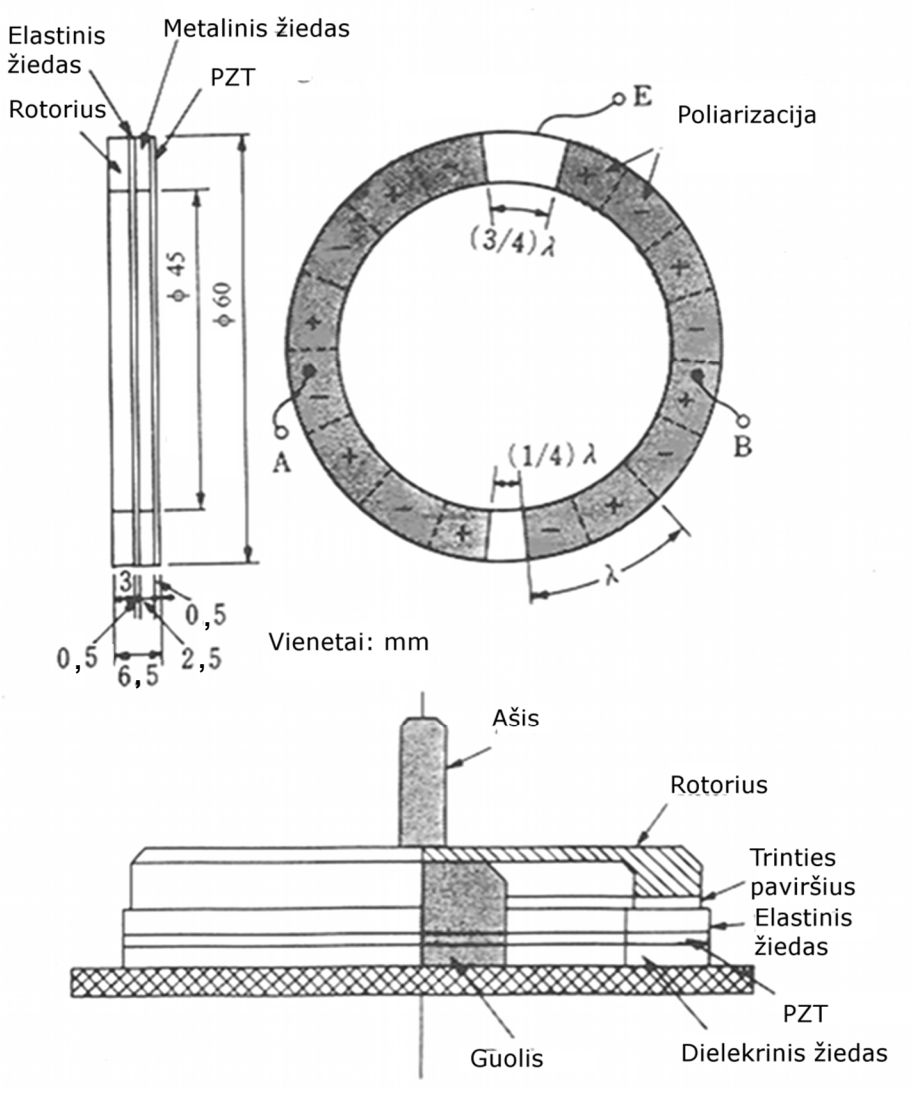
1.19 pav. Linijinis variklis, naudojantis bėgančios bangos vibraciją
Fig. 1.19. Linear motor using a bending vibration

Suderinus apkrovos varžą, priėmimo vibratoriuje sukuriama ideali bėganti banga. Sukeitus elektrinių vibratorių sužadinimo ir priėmimo funkcijas, galimas judėjimo reversas.

Naudojant skersinius virpesius, bėgančios bangos ilgis gali būti lygus keliems milimetrams, o siekiant užtikrinti strypo paviršiaus kontaktą su šliaužikliu, keičiamas skersinio pjūvio plotas arba strypo inercijos momentas.

Bėgančios bangos sukimosi pjezovariklio modelis, kurį sukūrė T. Sashida, pavaizduotas 1.20 paveiksle. Ploname pjezokeraminiame žiede sužadintos bėgančios bangos per tamprų elementą kontaktuoja su rotoriumi, kuris sukamas abiem kryptimis, keičiant sužadinimo įtampos fazę. Variklio privalumas: paprasta konstrukcija ir maži gabaritai bei plona struktūra, kurią galima sumontuoti kamerose, kaip automatinį fokusavimo prietaisą. Net 80% „Canon“ „EOS“ fotoaparatų serijos objektyvų buvo pakeisti šio tipo (arba jo modifikacijų) ultragarsiniais varikliais (Sashida, 1993).

Norint sukurti 9-tos harmonikos bėgančią bangą, kai pjezoelektrinio žiedo žadinimo dažnis 44 kHz, žiedas skirstomas į 16 teigiamai ir neigiamai poliarizuotų sričių ir dvi asimetriškas sritis tarp elektrodų.



1.20 pav. T. Sashida variklis
Fig. 1.20. T. Sashida‘s motor

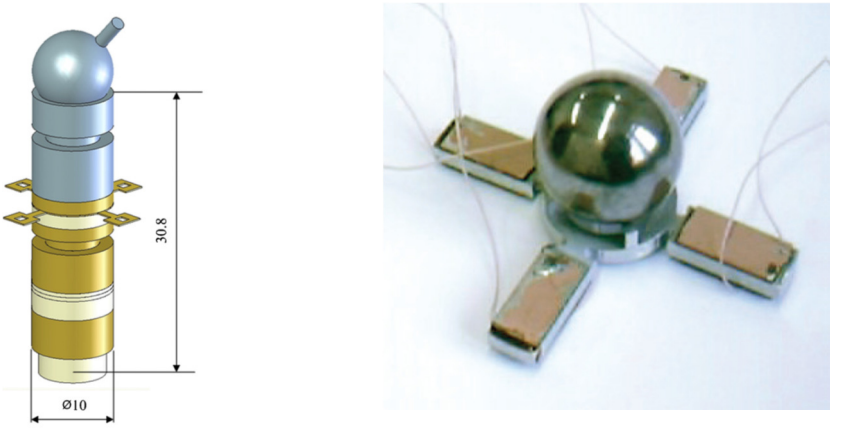
Variklio sukimosi mechanizmas pagamintas iš 60 mm išorinio ir 45 mm vidinio skersmens bei 2,5 mm storio žalvarinio žiedo, priklijuoto ant 0,5 mm storio pjezokeramikos žiedo su atskirais elektrodais priešingoje pusėje. Rotorius pagamintas iš polimero, padengto kieta guma arba poliuretanu.

1.3.4. Mišraus tipo daugelio laisvės laipsnių pjezoelektriniai keitikliai ir jų taikymas

Anksčiau paminėti modeliai yra paprasčiausios konstrukcijos pjezoelektriniai ultragarsiniai varikliai. Šie modeliai yra tik vieno laisvės laipsnio su reverso galimybe arba be jos.

Tam, kad sukurti judesį su keliais laisvės laipsniais taikomi sudėtingesnės konstrukcijos keitikliai, kuriuose gali būti panaudoti abu judesio generavimo mechanizmai: stovinčios ir bėgančios bangos. Taip pat gali būti naudojamos papildomos konstrukcijos žadinamų svyravimų amplitudžių padidinimui (Takemura, 2000; Dembele, 2006; Li, 2007; Takemura, 2008; Jung, 2008; Tian, 2010).

1.21a paveiksle pateikiamas trijų laisvės laipsnių, svyruojančio strypo tipo, vieno kontaktinio taško pjezokeitiklis naudojantis d_{33} krypties žadinimą. Šis keitiklis kuria linijinius reversuojamus judesius bet kuria plokštumos kryptimi.



a) b)

1.21 pav. 3-jų laisvės laipsnių pjezoelektriniai varikliai: a) Takemuros variklis, b) Vasiljevo variklis
Fig. 1.21. 3-DOF piezoelectric motors: a) Takemura's motor and b) Vasijev's motor

Keletą iš galimų konstrukcijų pasiūlė P. Vasiljevas. Vienas iš 3-jų laisvės laipsnių keitiklis pateikiamas 1.21b paveiksle. Šiuose keitikliuose naudojami uždaro žiedo svyruojančio strypo tipo statoriai. Dažniausiai tai keturi virpesių koncentratoriai sujungti į uždarą „žiedą"; kiekvieno jungiančio strypo viduryje yra kontaktinis taškas, kuris perduoda judesį į slankiklį. Šiuo atveju keitiklis

naudoja d_{31} svyravimų žadinimą ir gali kurti du linijinius slankiklio judesius ir sukamąjį.

1.4. Pjezoelektrinių keitiklių tyrimų apžvalga

Yra paskelbta daug mokslinių monografijų, straipsnių ir kitokių darbų pjezoelektrinių keitiklių taikymo tematika, todėl apžvelgiama tik ta literatūra, kuri glaudžiausiai susijusi su pjezoelektrinių keitiklių taikymuose ultragarsiniuose varikliuose.

Apie 1960-uosius metus buvo sukurtos pirmosios ultragarsinės virpesių sistemos. Jas pirmasis pradėjo tyrinėti M. Archangelskis (Архангельский, 1963). Jis pirmasis suformulavo teorinius principus, kaip pakeisti tampriojo strypo virpesius į kontaktuojančio kūno sukamąjį arba tiesiaeigį judesį. Jis analizavo strypo virpesius, teigdamas, jog egzistuoja strypo išilginių ir lenkimo virpesių superpozicija, ko pasėkoje strypo kontakto taškas juda elipsės formos trajektorija ir gaunamas pertraukiamo tipo mechaninis kontaktas, sukeliantis su juo sąveikaujančio kūno slenkamąjį ar sukamąjį judėjimą.

V. Lavrinenko ir jo vadovaujamas kolektyvas atliko daug tyrimų ultragarsinių virpesių srityje. Jie, panaudodami plokštelės ir žiedo formos pjezokeramiką, sukūrė ir ištyrė daug tipinių ultragarsinių virpesių sistemų, sukeliančių kieto kūno judėjimą (Вишневский, Лавриненко, 1980).

Svarbius teorinius ir eksperimentinius tyrimus pjezomechaninių ultragarsinių variklių srityje atliko, 1969 m. aktyvius darbus šioje srityje pradėję KTU ir mokslinės draugijos „Vibrotechnika“ mokslininkai K. Ragulskis, R. Bansevičius ir kt. (Бансявичюс, 1973; Бансявичюс, 1977; Бансявичюс, 1978; Бансявичюс, 1979; Бансявичюс, 1981). „Vibrotechnikos“ mokslininkų ir jos įkūrėjo bei ilgamečio vadovo akademiko K. Ragulskio atlikti pjezokeitiklių virpesių tyrimai turėjo įtakos kuriant fundamentinius teorinius vibromechanikos darbus. Monografijoje (Рагульскене, 1974) nagrinėjamos vibrosmūginės ultragarsinių variklių sąveikos su kietais kūnais problemos, sudaryti fizikiniai smūgio modeliai, įvedant į sąveikos modelį tamprumą ir plastiškumą.

R. Bansevičius ir K. Ragulskis tyrė vibracinių variklių veikimo bei konstravimo principus, teoriją, schemas, naudojant įvairias pjezokeitiklių konstrukcijas. Nagrinėtos strypinių pjezokeitiklių, atliekančių daugiamačius virpesius, elektrodų konfigūracijos, užtikrinančios paprastą ir reversinį išėjimo grandies judesį. Sukurtos strypinių pjezokeitiklių konstrukcijos, panaudojant kintamą poliarizacijos kryptį, dėl ko pavyksta sužadinti sudėtingus net keturių komponenčių pjezokeitiklio virpesius (Lietuvos mokslas, 1998). Plačiai nagrinėti cilindro formos ašinę bei radialinę poliarizaciją turintys pjezokeitikliai, jų elektrodų išdėstymas, žadinant išilginius – sukamuosius, lenkimo –

sukamuosius virpesius. Sukurti originalūs stovinčios ir bėgančios bangos tipo pjezokeitikliai, turintys žiedo sektoriaus, žiedo bei kitas kreivalinijines geometrines formas. Analizuota koncentratorių įtaka pjezokeitiklio virpesių amplitudei ir greičiui. Įvesta nauja aktyvios kinematinės poros sąvoka mechatronikoje bei sukurtos veikiančios konstrukcijos su kintamu laisvės laipsnių skaičiumi.

K. Ragulskis, R. Bansevičius, A. Busilas ir S. Seržentas nagrinėjo pjezoelektrinius skenavimo įrenginius. Mokslininkai pasiūlė optimalaus elektrodų išdėstymo pjezokeitiklio paviršiuje algoritmą, paremtą atsitiktine žadinimo zonų paieška, naudojant Sobolio taškus. Buvo sprendžiamas diskretinis globalinės optimizacijos uždavinys, kurio kriterijais laikomi skenerio dinaminiai, energetiniai ir funkciniai parametrai t. y. maksimalus pjezokeitiklio atsilenkimo kampinis greitis ar pagreitis, naudingo veiksmo koeficientas. Pasitelkiant šį algoritmą buvo atlikti plokštelės, cilindro ir žiedo formos pjezokeitiklių skaičiavimai. Taikydami BEM, mokslininkai taip pat nagrinėjo bimorfinius plokštelės bei kryžiaus formos pjezokeitiklius, jų dinaminius procesus.

Yra tyrinėta ir daug konkrečios formos ultragarsinių virpesių sistemų, pavyzdžiui G. Markauskaitė, R. Kurila, G. Patašienės darbuose (Маркаускайте, 1981; Паташене, 1979) tyrinėtos laisvųjų ir priverstinių žiedo virpesių formos, kai žiedas neįtvirtintas arba įtvirtintas tam tikruose taškuose. Realizuoti banginių variklių matematiniai modeliai, taikant BEM atlikti žiedo formos pjezokeitiklio dinaminiai skaičiavimai, nagrinėta vibrovariklių optimalaus projektavimo problema. Nustatyta, kad žiedo formos pjezokeitiklyje bėgančios bangos tipo virpesius galima sužadinti, panaudojant mažiausiai trijų fazių žadinančią įtampą. Sukurta banginių vibrovariklių eksperimentinių tyrimų metodika, naudojant lazerinės interferometrijos ir holografijos metodus. Žiedo formos pjezoelektriniai keitikliai, kurių konstrukciją sudaro metalinis žiedas ir pjezokeraminės plokštelė arba pjezokeraminis žiedas, yra labai plačiai taikomos ultragarsiniuose vibrovarikliuose. Tai parodo pasaulyje patentuotų vibrovariklių įvairovė (Engdahl, Kawai, Mori, Sashida, Schreiner, Tokusima, Vishnevsky, Yamamoto).

R. Barauskas, G. Kulvietis pirmieji pradėjo taikyti skaitinius metodus pjezokeitiklių tyrimams. Mokslininkai plačiai naudojo baigtinių elementų metodą, sukūrė tokius pjezoelektrinius baigtinius elementus: erdvinį aštuonių mazgų, plokštelės tipo bimorfinį asimetrinį bei kevalo tipo bimorfinį asimetrinį, atliko įvairių pjezokeitiklių konstrukcijų testinius skaičiavimus. Jie pasiūlė pjezokeitiklių savųjų dažnių skaičiavimo algoritmą, priklausomai nuo elektrodų išdėstymo. Taikant BEM, sudarė vibracinių variklių matematinius modelius, kai kontaktas yra nepertraukiamas arba diskretinis. Optimizavo banginio tipo variklių pjezokeitiklių geometrinius parametrus, maksimizuodami rotoriaus

vidutinį sukimosi greitį ir minimizuodami rotoriaus sukimosi netolygumo koeficientą. Tačiau toks geometrinių parametrų optimizavimo uždavinio sprendimas reikalavo didelių kompiuterinių resursų. Be to, šis algoritmas turėjo trūkumų, nes skaičiavimų metu buvo pastebėta, kad dėl pjezokeitiklio savųjų formų sekos pasikeitimų, tikslo funkcija kinta šuoliais ir sprendinys kartais nekonverguoja.

R. Barauskas ir V. Ostaševičius analizavo tampriąsias vibrosmūgines sistemas, sprendė jų optimizavimo problemas. Buvo sukurti bei pritaikyti skaitiniai algoritmai konstrukcijų pereinamų bei periodinių virpesių apskaičiavimui, nagrinėti konstrukcijų tampriųjų virpesių valdymo uždaviniai, atlikti vibrosmūginių sistemų, tame tarpe ir pjezokeitiklių, skaitiniai tyrimai. Mokslininkai skaitiškai tyrė pjezokeitiklių formos optimizavimo uždavinius periodiniais ir pereinamais režimais. Minimizuojant struktūros masę buvo rastos optimalios gembinės konstrukcijos keitiklių geometrinės formos, atitinkančios apibrėžtus virpesių tipus (Barauskas, Ostaševičius, 1998).

Naudojant pjezokeitiklius, sukurtos aktyviųjų guolių konstrukcijos, atlikti jų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai. 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 tiesiaeigį ar sukamąjį išėjimo grandies judesį atlikti. Daugelis jų konstrukcijų yra patvirtintos patentais ir panaudotos veikiančiuose vibracinio tipo įrenginiuose.

P. Vasiljevas nagrinėjo ultragarsines sistemas, kuriose buvo naudojami sudėtiniai laiptuotos formos pjezokeraminiai keitikliai. Sukurta teorija ir skaičiavimo metodika išilginiams rezonansiniams virpesiams minėtuose pjezokeitikliuose sužadinti. Panaudojus laiptuotos formos pjezokeitiklius sukurti tokie vibraciniai įrenginiai: vibrovarikliai, skysčių siurbliai ir purkštuvai, sintetinių medžiagų pjovimo – suvirinimo staklės, ypač smulkių birių medžiagų sijojimo įrenginiai bei kiti (Lietuvos mokslas, 1998).

V. Bubulis, K. Ragulskis tyrė skysčių ir birių medžiagų vibrodozatorius, paremtus pulsuojančių kamerų, bėgančios bei stovinčios bangos, vibrosmūginiais ir kitais principais. Pagrindinė vibrodozatorių sudėtinė dalis yra įvairių konstrukcijų pjezokeitikliai. Mokslininkai nagrinėjo žiedo, cilindro, strypo, disko formos pjezokeitiklių virpesius, jų žadinimo būdus ir valdymo schemas. Atlikta pjezokeraminių žiedų, naudojamų pulsuojančių kamerų dozatoriuose, skaitinė optimizacija, siekiant maksimizuoti vidutinį skysčio išėjimo greitį (Lietuvos mokslas, 1998; Bubulis, 2002).

Taip pat buvo sukurti ir tyrinėti žingsninio pobūdžio ultragarsiniai pjezoelektriniai varikliai. Jie ypatingi tuo, kad veikia aukštesniame nei įprasta dažnio diapazone ir tiksliai atkartoja postūmių dydį ir skaičių. Yra ištirta išilginių, išilginių ir lenkimo virpesių įtaka pjezovarikliams su transportuojamu

kūnu, priklausomai nuo pradinių sąlygų. Sudarytos žiedo formos pjezomechaninės sistemos, sąveikaujančios trinties pagalba su kieto kūno paviršiumi, diferencialinės judėjimo lygtys ir atlikti skaičiavimai (Бансявичюс 1978;, Бансявичюс, 1981).

Ypatingai daug dėmesio precizinių pjezoelektrinių įrenginių tyrimams skyrė Japonijos mokslininkai. Jų pastangomis sukurti vibrovarikliai, purkštuvai, skeneriai jau plačiai naudojami pramoniniuose ir buitiniuose įrenginiuose. T. Sashida ir T. Kenjo (Sashida, 1982), S. Ueha ir Y. Tomikawa (Ueha, 1993). Šių autorių monografijose suformuluoti pagrindiniai pjezoelektrinių keitiklių virpesių dėsniai, aprašytos įvairios jų konstrukcijos ir žadinimo būdai, atlikti įvairiapusiai tyrimai. K. Uchino, Y. Sashida S. Ueha buvo pirmieji Japonijos mokslininkai, sukūrę ir išnagrinėję impulsinius ir ultragarsinius vibrovariklius, jų veikimo principus, pjezokeitiklių konstrukcijas, elektrodų formas ir topologiją.

Vystantis ir tobulėjant banginiams ir linijiniams vibrovarikliams, buvo sukurta labai daug įvairių pjezoelektrinių ultragarsinių variklių konstrukcijų (Бансявичюс, 1975; 1977; 1978; 1979; Рагульскис, 1973;, He Chen, 1998). Sudaryti virpesių sumavimo plokštumoje ir erdvėje būdai (Бансявичюс, 1973; 1977; 1979; Bansevičius, 2005; 2008; 2011), kurių pagrindu sukurti pjezokeitikliai rotoriniams ir linijiniams supertiksliems mikrovarikliams. Buvo sudarytos schemos, kai keitikliai sąveikauja su kitu kūnu – varomąja grandimi – vienu tašku, keliais taškais, tiese, plokštuma (Sashida, Ueha, Zumeris 1995; 1997; Yabuki, Hemsel 2000; Kurosawa, 2001). Taip pat buvo tobulinamos pjezokeitiklių konstrukcijos (Hirata, Kurosawa 1999) ir kuriami fizikiniai – matematiniai modeliai (Бансявичюс, 1981; Ueha, 1998; Hagedorn, 2003).

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Pjezoelektrinės medžiagos pasižymi savybe keisti elektrinę energiją į mechaninę ir atvirkščiai. Tai netiesines fizines savybes turinčios medžiagos. Pjezoelementai gaminami įvairių geometrinių formų ir jų taikymo spektras yra gana platus. Tinkamai žadinant pjezokeitiklį, galima generuoti įvairias kontaktinio taško judesio trajektorijas, kurios panaudojamos slankiklio ar rotoriaus judesiui formuoti. Įvairiausios geometrinės pjezokeitiklių formos, elektrodų žadinimo būdai ir veikimo principai leidžia plačiai taikyti pjezokeitiklius.

Remiantis atlikta mokslinės literatūros analize galima daryti tokius apibendrinimus:

1. Žadinant pjezoelektrinius keitiklius harmoniniu signalu, judesys iš statoriaus į slankiklį/rotorių perduodamas formuojant keitiklio kontaktinio taško

virpesius elipsine trajektorija. Elipsinei virpesių trajektorijai generuoti pasitelkiamas vienas iš dviejų principų: stovinčios bangos arba bėgančios bangos.

2. Stovinčios bangos principu veikiančiuose vieno laisvės laipsnio su reverso galimybe pjezoelektriniuose varikliuose dažniausiai naudojama kelių virpesių tipų superpozicija, pvz. skersinių ir išilginių. Tokių keitiklių žadinimui pakanka vieno elektrinio harmoninio signalo ir atitinkamos elektrodų topologijos bei žadinimo schemos. Reversiniam slankiklio ar rotoriaus judesiui sužadinti pakanka sukeisti žadinimo schemos poliškumą.

3. Bėgančios bangos principu veikiančiuose vieno laisvės laipsnio su reverso galimybe pjezoelektriniuose varikliuose dažniausiai naudojami du elektriniai žadinimo signalai su atitinkamu fazės skirtumu. Tam, kad sužadinti reversinį slankiklio ar rotoriaus judesį pakanka pakeisti fazės skirtumo ženklą.

4. Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad yra naudojami tik keli būdai trijų laisvės laipsnių slankiklio judesiui formuoti. Vienas iš jų naudoja sudėtingą trijų ar daugiau keitiklių sistemą, kurioje kiekvienas iš keitiklių formuoja tik vieną judesio komponentę. Trijų laisvės laipsnių judesį taip pat formuoti galima naudojant žiedo arba cilindro formos pjezokeitiklius. Tokiuose keitikliuose virpesiai generuojami pasitelkiant stovinčios ir bėgančios bangos principus. Parinkus atitinkamą elektrodų topologiją, minėti virpesiai žadinami 4-riais harmoniniais signalais. Pasirinkus atitinkamą fazių skirtumą tarp signalų galima generuoti dviejų krypčių slenkamuosius slankiklio judesius arba vieną sukamąjį.

Atsižvelgiant į pateiktus apibendrinimus, suformuluoti pagrindiniai šio darbo uždaviniai:

– Sukurti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezokeitiklių skaitinius modelius ir atlikti jų tyrimą.

– Nustatyti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos keitiklių geometrinius matmenis.

– Sukurti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezoelektrinių keitiklių elektrodų konfigūracijos paieškos algoritmą daugiakomponenčių virpesių žadinimui.

– Sukurti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezokeitiklių prototipus, eksperimentiškai išmatuoti keitiklių tariamąją varžą ir kontaktinio taško trajektorijas, žadinant keitiklius skirtingoms žadinimo schemoms.

– Atlikti skaitinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų lyginamąją analizę, pateikti išvadas ir rekomendacijas.

2

Elipsinių trajektorijų formavimas pjezoelektriniais keitikliais su nevienakrypčiais poliarizacijos vektoriais

Kontaktinio taško dviejų ar trijų komponenčių virpesių generavimo uždavinys, leidžiantis keisti šių virpesių parametrų santykius, yra esminis kuriant pjezoelektrinius keitiklius daugelio laisvės laipsnių ultragarsiniams varikliams. Naudojami keturi kriterijai, kurie leidžia kokybiškai įvertinti keitiklių pritaikomumo galimybes formuojant daugiakomponenčius virpesius.

I. Kiekvienos iš virpesių dedamųjų amplitudės nepriklausomo valdymo galimybė.
II. Turi būti užtikrinta galimybė parinkti bet kokį fazių skirtumą tarp virpesių komponenčių.
III. Kontaktas su judinamąja dalimi (slankikliu/rotoriumi) turi būti tašku plokštumoje ar paviršiumi.
IV. Bendrų virpesio mazgų visoms komponentėms egzistavimas.

Pirmų dviejų kriterijų tenkinimas suteikia optimalių darbo režimų ir poslinkio reverso parinkimo galimybę. Trečio kriterijaus tenkinimas užtikrina keitiklio ilgaamžiškumą kontaktinio taško zonoje esant dideliems įtempimams. Ketvirtas

kriterijus yra svarbus tiems keitikliams, kur ypatingai svarbi virpesių mazgų padėtis esant skirtingiems virpesiams. Šis reikalavimas yra svarbus užkertant virpesių slopinimui, kuri gali sukelti virpesių energijos nutekėjimas į keitiklio laikiklį. Kriterijai yra konstrukcinės prigimties, sąlygojantys slankiklio greičio stabilumą, kai kontakto zonoje perduodama judesio energiją nuo keitiklio slankikliui (Bansevičius, Ragulskis,1981).

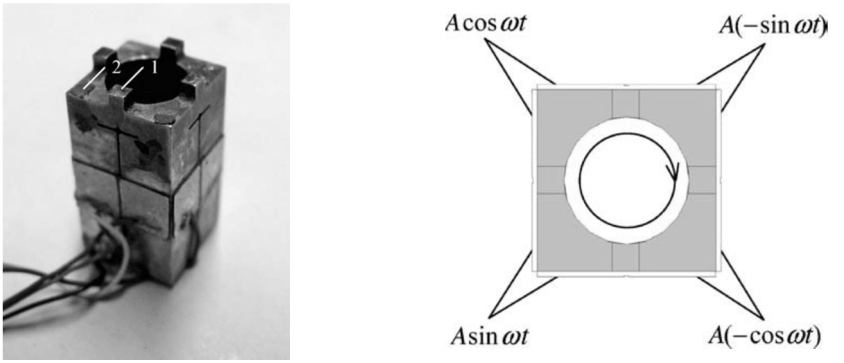
Šiame skyriuje pateikiamos dviejų pjezokeitiklių konstrukcijos. Analitiškai aptariami pagrindiniai sprendimai nulėmę keitiklių konstrukcijų pasirinkimą.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Vasiljev, P.; Borodinas, S.; Bareikis, R.; Lučinskis, R. 2008), (Lučinskis, Mažeika, Bansevičius 2009), (Mažeika, D.; Lučinskis, R.; Bansevičius, R. 2011) ir (Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Hemsel, T.; Bansevičius, R. 2012).

2.1. Nevienakryptės poliarizacijos panaudojimas daugiakomponentiniams simetriniams virpesiams generuoti

Toliau bus nagrinėjamas nevienakryptės poliarizacijos panaudojimas daugelio laisvės laipsnių svyravimus generuojančiuose keitikliuose. Tokių keitiklių pagrindinė paskirtis – sukurti kontaktinio taško zonoje lenkimo svyravimus plokštumoje statmenoje keitiklio išilginei ašiai bei išilginius virpesius išilgai keitiklio ašies. Tokių virpesių superpozicija turėtų suteikti galimybę generuoti kontaktiniame taške keturių tipų elipsines trajektorijas: *xOz* plokštumoje, *yOz* plokštumoje, *xOy* plokštumoje ir laisvai pasirinktoje erdvėje plokštumoje *x'Oy'*. Tokio tipo konstrukcijos įgalintų kontakto zonoje perduoti judesį į slankiklį *x*, *y* kryptimis arba sukurti sukimo momentą apie ašį *z*.

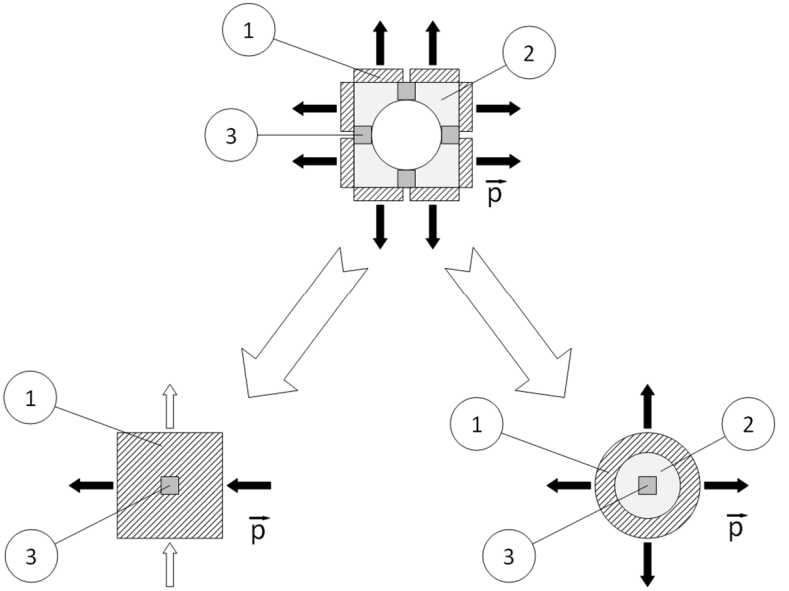
Vienas iš galimų tokio keitiklio modelių pateiktas 2.1 paveiksle (Vasiljev, Lučinskis, 2008). Tai kvadratinio skerspjūvio strypo formos keitiklis, galintis per kontaktines zonas perduoti judesį į plokštelės arba sferinės formos slankiklį. Keitiklio konstrukciją sudaro specialios konstrukcijos metalinis statorius, kurį sudaro į žiedą sujungti keturi svyruojančio strypo tipo virpesių koncentratoriai *2* su kontaktiniais taškais *1* ir per visą perimetrą pritvirtintomis pjezoelektrinėmis d_{31} plokštelėmis. Kiekvienos plokštelės poliarizacijos vektorius yra statmenas išilginei keitiklio ašiai ir nukreiptas nuo keitiklio centro į išorę. Metalinis statorius atlieka centrinio elektrodo funkciją ir yra įžemintas. Išoriniai kiekvienos plokštelės elektrodai yra padalinti per puse išilgai keitiklio ašies. Išoriniai elektrodai žadinami tokia tvarka, kad elektrodai esantys virš to pačio koncentratoriaus žadinami tuo pačiu signalu (2.1b pav.). Iš viso yra naudojami keturi žadinimo kanalai.



a) b)

2.1 pav. Kvadratinio skerspjūvio strypo formos daugelio laisvės laipsnių keitiklis: a) keitiklio modelis ir b) jo žadinimo schema sukamajam judesiui (Vasiljev, Lučinskis, 2008)

Fig. 2.1. Multi-DOF square-bar shaped stator: a) model of actuator and b) its connection for rotary motion



2.2 pav. Monolitiniai pjezokeitikliai su daugiakrypte poliarizacija kaip sudėtingos virpančios sistemos atitikmuo (1 – pjezokeraminė plokštelė, 2 – metalinė šerdis, 3 – kontaktinis taškas)

Fig. 2.2. Monolithic piezoelectric actuators with multidirectional polarization as equivalent of complicated oscillation system (1 – piezoceramic plate, 2 – metal core, 3 – contact point)

Naudojant atskiras kanalų žadinimo kombinacijas galima suformuoti tokius kontaktinių taškų judesius, kad jie sugebėtų generuoti du atskirus statmenus vienas kitam linijinius judesius, ir žadinant kontakto zonoje bėgančią bangą generuoti sukamąjį judesį. Žadinant tas pačias žadinimo formas atvirkštine tvarka būtų generuojami poslinkiai reverso kryptimi.

Jei atkreipsime dėmesį į pastarojoje konstrukcijoje panaudotą pjezoelektrinės keramikos išdėstymą, pastebėsime, kad bendruoju atveju naudojamos keturios pjezokeramikos poliarizacijos vektoriaus kryptys (2.2 pav.), t. y. normalės kryptimi poliarizuotos plokštelės išdėstytos keitiklyje taip, kad poliarizacijos vektorius nukreiptas nuo metalinio statoriau šono į išorę. Taigi, galima daryti prielaidą, kad keitiklio kontaktinių taškų trijų laisvės laipsnių virpesiai yra galimi, dėl pjezoplokštelių poliarizacijos vektorių krypčių nevienalytiškumo.

Pateiktą modelį galima būtų ekstrapoliuoti dviem kryptimis: mažinant poliarizacijos vektorių krypčių kiekį, arba jį didinant (2.2 pav.). Jei atsižvelgsime į pirminio modelio poliarizacijos vektorių krypčių padėtį, pastebėsime, kad priešingose pusėse patalpintų keitiklių poliarizacijos vektoriai yra lygiagretus, o pagal perimetrą šalia esančių keitiklių poliarizacijos vektorių kryptys yra statmenos. Vienas iš ekstrapoliuotų modelių galėtų būti monolitinis kvadratinio skersmens pjezokeraminių keitiklių turintis dvi poliarizacijos kryptis, statmenas viena kitai. Kitas iš ekstrapoliuotų modelių galėtų būti tuščiaviduris cilindrinis pjezokeraminis keitiklis su radialine poliarizacija, kurių poliarizacijos vektorių kryptis būtų statmenos taškuose kurių liestinės yra statmenos. Taigi, šiame darbe toliau bus nagrinėjami du pjezoelektrinių keitiklių modeliai: keitiklis su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis ir keitiklis su radialine poliarizacija.

2.1.1. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektorių kryptimis modelis

Dabar reikia pasirinkti keitiklio geometriją. Vienas iš geometrijos pasirinkimo kriterijų yra galimybė generuoti keitiklio kontaktiniame taške tam tikro dažnio skersinius ir išilginius virpesius, kurių superpozicija brėžtų elipsinę trajektoriją pasirinktoje plokštumoje. Tam, kad būtų pasiekiamas kuo aukštesnis efektyvumas, dažnis tūri būtį tikrinis kaip ir išilginiams taip ir skersiniams virpesiams.

Tokį kriterijų tenkina simetrinio skerspjūvio strypas, pvz. kvadratinio skerspjūvio. Taigi, reikia parinkti tokį kvadratinio skerspjūvio keitiklio plotį ir ilgį, kad sutaptų skersinių ir išilginių virpesių tikriniai dažniai.

Išilginių ir skersinių virpesių tikrinės reikšmės apskaičiuojamos Rėlėjaus-Ritco metodu. Išilginių virpesių tikrinės reikšmės, kai abu strypo galai yra neįtvirtinti, randamos sekančios lygties pagalba:

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l}\sqrt{\frac{E}{\rho}}\,, \tag{2.1}$$

čia ω_n – išilginių virpesių n-tasis tikrinis dažnis, n – tikrinės vertės eilė, l – strypo ilgis, E – tempiamo strypo Jungo modulis, ρ – strypo ilgio vieneto medžiagos tankis.

Skersinių virpesių atveju, esant lenkimo virpesiams, tikrinius dažnius neįtvirtintam strypui apskaičiuojamos sekančia lygtimi:

$$\omega_{n\prime} = \frac{k_{n\prime}\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{EI_p}{m}}\,, \tag{2.2}$$

čia $k_{n\prime}$ – n-toji tikrinė vertė, I_p – strypo skerspjūvio ploto inercijos momentas, m – strypo masė. Esant laisviems svyravimas neįtvirtintame strype $k_{n\prime}$ įgauna sekančias vertes:

- kai n=1, tai $k_n = 4{,}730$;
- kai n=2, tai $k_n = 7{,}853$;
- kai n=3, tai $k_n = 10{,}996$;
- kai n=4, tai $k_n = (2\mathrm{n} - 1)\pi$.

Stačiakampio strypo skerspjūvio ploto inercijos momentas išreiškiamas lygtimi

$$I_p = \frac{Sh^2}{12}\,, \tag{2.3}$$

čia $S = bh$ – keitiklio skerspjūvio plotas, h – keitiklio aukštis lygiagretus svyravimo plokštumai, b – keitiklio plotis (statmenas svyravimo plokštumai). Įstačius išraišką 2.3 į 2.2 gauname:

$$\omega_{n\prime} = \frac{k_{n\prime}\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho}}\,. \tag{2.4}$$

Norint pasiekti kontaktinio taško virpesių trajektorijų simetriškumą skirtingose plokštumose reikia, kad tikriniai išilginių ir skersinių svyravimų dažniai tenkintų sąlygą:

$$\omega_{n\prime} = \omega_n\,. \tag{2.5}$$

Tikriniai virpesių dažniai priklauso nuo strypo geometrijos, šią sąlygą gali tenkinti tik tam tikros geometrijos strypas. Ją rasime išsprendę lygybę:

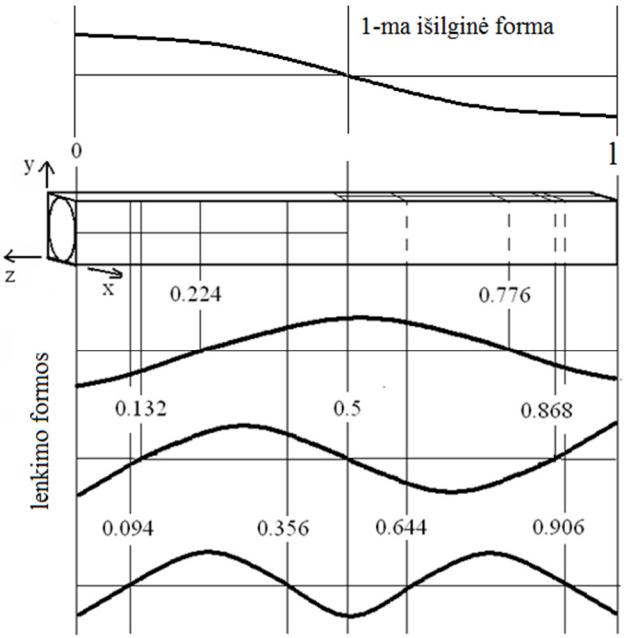
$$\frac{k_{n\prime}\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{h^2E}{12\rho}} = \frac{n\pi}{l}\sqrt{\frac{E}{\rho}}\,. \tag{2.6}$$

Iš šios lygybės išreiškus l, gauname, kad

$$l = \frac{k_{n\prime}\pi h}{2\sqrt{3}n}\,. \tag{2.7}$$

Kuo aukštesnė tikrinių virpesių eilė, tuo didesni energijos nuostoliai. Išilginių virpesių tikriniai dažniai yra labiau pasislinkę didesnių dažnių link nei tikriniai skersiniai dažniai. Dėl šios priežasties naudosime 1-mą tikrinį išilginių virpesių dažnį, t. y. 1-mą išilginių virpesių formą (2.3 pav.). Jei, keitiklio skerspjūvio matmenis parinksime taip, kad $b = h = 4$ mm, tai pagal (2.7) keitiklių ilgiai 1-mai, 2-trai ir 3-čiai skersinių virpesių formoms bus:

- kai n=1, tai $l = 17{,}2$ mm;
- kai n=2, tai $l = 28{,}5$ mm;
- kai n=3, tai $l = 39{,}6$ mm.



2.3 pav. Strypo išilginių ir skersinių lenkimų superpozicijos pagrindai. Tikrinės išilginių ir skersinių virpesių formos

Fig. 2.3. Basics of principle on superposition of longitudinal and flexural oscillations of a beam. Longitudinal and bending modes

Nors 2-ra skersinė virpančio strypo forma turi vieną mazgą, ir jis sutampa su strypo išilginių virpesių 1-mos formos mazgu, ji netinka, nes yra asimetrinė keitiklio ašies atžvilgiu. Kontakto su slankikliu atveju, tokios virpesių formos generuotų pašalinį keitiklio lingavimą, o tai yra svyravimų energijos nutekėjimas, kuris tokiu atveju būtų nepageidaujamas.

Lyginant 1-mą ir 3-čią skersines formas, jos abi turi du mazgus, bet pastarosios formos keitiklio ilgis yra didesnis, taigi, ir jo viršūnės svyruos didesne amplitude. Taigi, galutinai pasirinkti pjezoelektrinio keitiklio matmenys yra: $b = h = 4$ mm ir $l = 39{,}6$ mm (2.4 pav.).

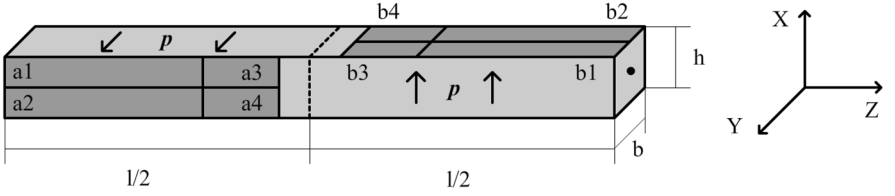
Tyrimui buvo panaudotas keitiklis pagamintas iš PIC255 pjezokeramikos (PICeramics, 2011). Tai modifikuota pjezoelektrinė keramika pasižyminti aukšta Kiuri temperatūra, aukšta dielektrine skvarba, aukštu pjezoelektriniu koeficientu d_{31}. Medžiaga yra optimizuota taikymui dinaminiuose keitikliuose, skirtuose dirbti aukštos temperatūros aplinkoje. Aukštas elektromechaninis koeficientas, mažas mechaninių nuostolių faktorius ir mažas temperatūros koeficientas daro šią medžiagą tinkama naudoti mažos galios ultragarsiniuose keitikliuose.

2.1 lentelė. Dviejų poliarizacijos krypčių keitiklio medžiagos pagrindiniai parametrai
Table 2.1. Basic material properties of transducer of two polarization directions

Parametrai	PIC 255
Tankis ρ, g/cm^3	7,80
Kiuri temperatūra T_C, ^oC	350
Puasono koeficientas ν	0,34
Dielektrinės skvarbos modulių matrica $[\varepsilon_{ij}^T/\varepsilon_0]$	$\begin{bmatrix} 1200 & 0 & 0 \\ 0 & 1200 & 0 \\ 0 & 0 & 750 \end{bmatrix}$
Pjezomodulių matrica [d], C/m^2	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 10{,}6589 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10{,}6589 & 0 & 0 \\ -7{,}0931 & -7{,}0931 & 14{,}4784 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Tamprumo modulių matrica [c^D], x10^{10} N/m^2	$\begin{bmatrix} 10{,}528 & 5{,}8228 & 5{,}5844 & 0 & 0 & 0 \\ 5{,}8228 & 10{,}528 & 5{,}8228 & 0 & 0 & 0 \\ 5{,}5844 & 5{,}8228 & 8{,}6456 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}9380 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}9380 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2{,}3524 \end{bmatrix}$

Pjezoelektrinė medžiaga yra anizotropinė, o tai reiškia, kad strypo standumas priklausys nuo poliarizacijos vektoriaus krypties, ko pasėkoje, strypo virpesių tikriniai dažniai skirtingomis kryptimis bus skirtingi. Vienintelis išeitis, pasiekti simetrija. Taigi, siūlomas pjezoelektrinio keitiklio modelis yra kvadratinio skerspjūvio strypas, kurio viena ilgio pusė yra poliarizuota statmenai kitai keitiklio ilgio pusei ir abi poliarizacijos kryptys yra statmenos keitiklio išilginei ašiai (2.4 pav.). Pateikiamas keitiklis yra ypatingas tuo, kad yra poliarizuotas simetriškai, pusė keitiklio ilgio yra poliarizuota kryptimi, o kita

pusė keitiklio yra poliarizuota kryptimi lygiagrečia *Ox*, statmena pirmajai poliarizacijos krypčiai ir statmena keitiklio išilginei *Oz* ašiai.



2.4 pav. Pjezoelektrinis keitiklis su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis: a ir b keitiklio dalys padalintos 1, 2, 3, ir 4 elektrodus

Fig. 2.4. Principle scheme of the piezoelectric actuator with two direction of polarization vector: a and b sections of piezoelectric actuator are divided into 1st, 2nd, 3rd and 4th electrodes

Keitiklio elektrodai padalinti tokiu būdu, kad juos sužadinus būtų gaunami lenkimo svyravimai lygiagretūs vienai iš lenkimo ašių, žadinant skersinius virpesius, keitiklio kontaktinio taško trajektorija būtų lygiagreti horizontalioms svyravimų ašims, o žadinant išilginius virpesius, formuotų erdvinę trajektoriją, pasvirusią vertikalios ašies atžvilgiu.

Kiekvienos keitiklio pusės elektrodai yra padalinti į keturis elektrodus: 3-čias ir 4-tas elektrodai skirti išilginiams virpesiams žadinti, kita dalis (1-mas ir 2-ras elektrodai) skirta lenkimo virpesiams žadinti. Žadinimo ir įžeminimo elektrodai yra padalinti atitinkamai. Tam, kad sužadinti svyravimus pageidaujamoje plokštumoje, žadinami atitinkami elektrodai. Norint sužadinti svyravimus *xOz* plokštumoje yra žadinami a-dalies 1-mas arba 2-ras elektrodai priklausomai nuo svyravimų fazės, kuriuos norime gauti. Jei norime sužadinti svyravimus *yOz* plokštumoje, tai mes žadiname b-dalies 1-mą arba 2-rą elektrodus. Tam, kad galėtumėme kontroliuoti keitiklio kontaktinio taško trajektorijos vertikaliąją dedamąją žadinami a ir b dalies 3-čias ir 4-tas elektrodai. Žadinant pasirinktus elektrodus kiti likę elektrodai yra įžeminami. Šio tyrimo metu buvo naudojamos trys žadinimo schemos:

Nr. 1 – žadinant a1 ir a3 elektrodus generuojami svyravimai *xOz* plokštumoje;

Nr. 2 – žadinant b1 ir b3 elektrodus generuojami svyravimai *yOz* plokštumoje;

Nr. 3 – žadinant a1, a3, b1 ir b3 elektrodus generuojami svyravimai *xyz* erdvėje.

2.1.2. Pjezoelektrinio keitiklio su radialine poliarizacijos vektorių kryptimi modelis

Parenkant cilindrinio keitiklio geometriją galioja tie patys reikalavimai, kaip ir kvadratinio skerspjūvio keitikliui (žr. 44 psl.). Kadangi cilindrinė forma yra savaime simetrinė išilginės ašies atžvilgiu, pakanka pasirinkti keitiklio skersmenį ir apsiskaičiuoti jo ilgį.

Keitiklio geometrijos skaičiavimui naudosime išilginių ir skersinių virpesių tikrinių dažnių lygtimis (2.1) ir (2.2). Tik šiuo atveju, skerspjuvio inercijos ploto momentas išreiškiamas lygtimi:

$$I_p = \frac{\pi}{4} R^4 \,. \tag{2.8}$$

Įsistatę šias išraiškas į sąlygą (2.5) ir iš šios lygybės išreiškus l, gauname, kad:

$$l = \frac{k_{n'} \pi R}{2n} \,. \tag{2.9}$$

Dėl didesnių energijos nuostolių esant aukštesnei virpesių eilei, naudosime 1-mą tikrinį išilginių virpesių dažnį, t. y. 1-mą išilginių virpesių formą (2.3 pav.). Jei, keitiklio šerdies skerspjūvio matmenis parinksime taip, kad R = 1,6 mm, tai pagal (2.9) keitiklių ilgiai 1-mai, 2-trai ir 3-čiai skersinių virpesių formai bus:

- kai n=1, tai $l = 11{,}9$ mm;
- kai n=2, tai $l = 19{,}7$ mm;
- kai n=3, tai $l = 27{,}3$ mm.

Lyginant 1-mą, 2-rą ir 3-čią skersines formas, pastarosios formos keitiklio ilgis yra didesnis, taigi, ir jo viršūnės svyruos didesne amplitude. Taigi, galutinai pasirinkti pjezoelektrinio keitiklio matmenys yra: R = 1,6 mm ir l = 27,3 mm (2.5 pav.).

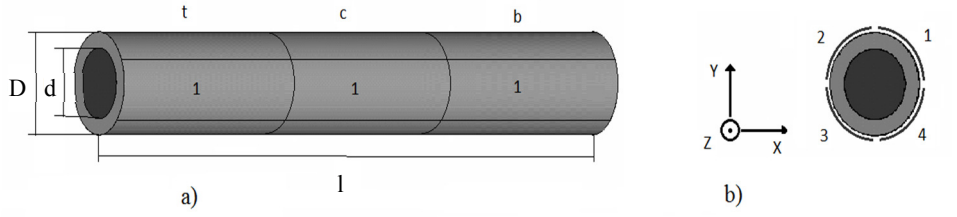
Tyrimui buvo panaudotas pjezoelektrinis tuščiaviduris cilindrinis elementas pagamintas iš PIC151 pjezokeramikos su žalvarine šerdimi. Pjezoelektrinės keramikos keitiklio matmenys yra: D = 3,2 mm, d = 2,2 mm ir l = 27,3 mm.

PIC151 tai modifikuota švino cirkonato – švino titanato pjezoelektrinės keramikos medžiaga su didele dielektrine skvarba, aukštu ryšio koeficientu ir aukštu pjezoelektriniu koeficientu. Ši medžiaga yra standartinė medžiaga pavaroms (PICATM serija) ir tinka mažos galios ultragarsiniams keitikliams ir žemo dažnio garso keitikliams.

Pjezoelektrinė medžiaga yra anizotropinė, o tai reiškia, kad strypo standumas priklausys nuo poliarizacijos vektoriaus krypties. Kadangi cilindrinė forma yra simetrinė ašies atžvilgiu, strypo virpesių tikriniai skersinių virpesių dažniai skirtingomis kryptimis bus vienodi. Taigi, siūlomas pjezoelektrinio keitiklio modelis yra apskritimo skerspjūvio strypas, kurio aktyvioji dalis, pjezokeramika, turi radialinę poliarizaciją (2.4 pav.).

2.2 lentelė. Radialinės poliarizacijos keitiklio medžiagos pagrindiniai parametrai
Table 2.3. Basic material properties of transducer of radial polarization

Parametrai	PIC151
Tankis ρ, g/cm^3	7,80
Kiuri temperatūra T_C, ^oC	250
Puasono koeficientas ν	0,34
Dielektrinės skvarbos modulių matrica $[\varepsilon_{ij}^T/\varepsilon_0]$	$\begin{bmatrix} 1110 & 0 & 0 \\ 0 & 1110 & 0 \\ 0 & 0 & 850 \end{bmatrix}$
Pjezomodulių matrica [d], C/m^2	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 11{,}9702 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 11{,}9702 & 0 & 0 \\ -9{,}5226 & -9{,}5226 & 15{,}1393 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Tamprumo modulių matrica $[c^D]$, x10^{10} N/m^2	$\begin{bmatrix} 10{,}760 & 6{,}313 & 6{,}386 & 0 & 0 & 0 \\ 6{,}313 & 10{,}760 & 6{,}386 & 0 & 0 & 0 \\ 6{,}386 & 6{,}386 & 10{,}041 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}962 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}962 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2{,}224 \end{bmatrix}$



2.5 pav. Pjezoelektrinis keitiklis su radialinės poliarizacijos vektoriaus kryptimis (a, b, c – keitiklio elektrodų sekcijos padalintos į keturis elektrodus 1, 2, 3 ir 4)
Fig. 2.5. Scheme of the piezoelectric actuator with radial vector of polarization (a, b, c – electrodes sections of actuator divided into four electrodes s 1, 2, 3 and 4)

Tai yra cilindro formos pilnaviduris strypas sudarytas iš metalinės šerdies patalpintos pjezokeraminiame cilindre padengtame plonu sidabro elektrodu (2.5 pav.). Metalinės šerdies skersmuo yra lygus keraminio cilindro vidiniam skersmeniui. Pjezokeraminis cilindras yra poliarizuotas radialine kryptimi – poliarizacijos vektoriaus kryptis kiekviename cilindro taške yra statmena jo išilginei ašiai ir yra nukreipta išorinio cilindro paviršiaus kryptimi. Metalinė

šerdis yra įžeminta, ir atlieka statoriaus ir vidinio elektrodo funkcijas. Išorinio elektrodo paviršius radialine kryptimi išilgai savo ašies yra padalintas į keturias dalis 1, 2, 3, 4; o ašies kryptimi išilgai cilindro perimetro į tris sekcijas a, b, c. Ši keitiklio konstrukcija parinkta tokiu būdu, kad rezonansiniai dažniai: 1-os išilginių virpesių formos ir 3-ios skersinių virpesių formos sutaptų. Žadinant atitinkamą elektrodų kombinaciją būtų generuojama 3-ioji skersinių virpesių forma pasirinktoje plokštumoje.

Sekcijos b ilgis parinktas taip, kad sutaptų su 3-ios skersinių virpesių formos centriniam pusbangio ilgiui tarp dviejų svyravimo mazgų, t. y. nuo 0,356 iki 0,644 strypo ilgio *l* dalies. Kiekvieno elektrodo plotis yra lygus ¼ perimetro ilgiui ir orientuotas tokiu būdu, kad elektrodo centras yra statmenas vienai iš koordinačių sistemos ašių *Ox* arba *Oy*. Zonų a ir c paskirtis – generuoti virpesius pasirinktoje plokštumoje, o zona b yra naudojama išilginių virpesių žadinimui. Norint sugeneruoti virpesius pasirinktoje plokštumoje žadinami tik tie elektrodai, kurių plokštumos yra statmenos pasirinktos plokštumos horizontaliajai ašiai, t. y. norint sužadinti svyravimus xOz plokštumoje žadinami a1, a3, b1, b3, c1, c3 elektrodai harmoniniais signalais tokia kombinacija, kokios fazės svyravimus norėtume gauti. Žadinant pasirinktus elektrodus kiti likę elektrodai yra įžeminami.

Šio tyrimo metu buvo naudojamos trys žadinimo schemos:

Nr. 1 – žadinant a1, b3, c1 elektrodus cosα signalu o a3, b1, c3 elektrodus sinα signalu generuojami virpesiams *xOz* plokštumoje;

Nr. 2 – žadinant a2, b4, c2 elektrodus cosα signalu o a4, b2, c4 elektrodus sinα signalu generuojami virpesiams *yOz* plokštumoje;

Nr. 3 – žadinant a1, b1, b2, b3, b4, c1 elektrodus cosα; a2, c2 – sinα; a3, c3 – -cosα; o a4, c4, – -sinα signalais generuojami virpesiams *xyz* erdvėje.

2.2. Pjezokeitiklių skaitiniai modeliai

Projektuojant vibracinių pjezoelektrinių įrenginių konstrukcijas, iškyla aktuali problema, kaip nustatyti pjezokeitiklių geometrinius parametrus. Pjezokeitiklio geometriniais parametrais yra laikomi ne tik keitiklio matmenys, bet ir tvirtinimo sąlygos t. y. jų išdėstymo vieta bei kryptis. Pjezokeitiklių geometrinių parametrų radimas ypač svarbus nagrinėjant strypo, cilindro ar kitos geometrijos trimačio pjezokeitiklio daugiakomponenčius virpesius, kai tikrinių virpesių formos yra charakterizuojamos kaip sudėtingos geometrinės figūros. Dažniausiai pjezokeitiklių geometrinių parametrų skaičiavimo uždaviniai sprendžiami neatsiejamai nuo viso vibracinio įrenginio, kuriame jie yra montuojami, todėl skaičiavimų ciklas yra pakankamai ilgas ir komplikuotas. Siekiant supaprastinti sudėtingą skaitinį tyrimą, racionalu skaidyti uždavinį į mažesnes dalis, kurios

gali būti lengvai sprendžiamos. Apjungiant uždavinio dedamųjų dalių tyrimų rezultatus, galima suformuoti galutinį rezultatą. Toks algoritmas yra priimtinas bei gali būti panaudotas atliekant ir daugiamačių pjezokeitiklių geometrinių parametrų skaičiavimus

Pjezoelektrinių sistemų skaitinius tyrimus patogiausia atlikti naudojant baigtinių elementų metodą. Taikant šį metodą pjezoelektrinių sistemų diskretizavimui, galima įvertinti mechaninių ir elektrinių laukų tarpusavio sąveiką. Pjezoelektrinių sistemų modeliavimui naudojami baigtiniai elementai be įprastinių mechaninių laisvės laipsnių turi turėti papildomą mazginį laisvės laipsnį elektriniam potencialui. Naudojant baigtinių elementų metodą, sprendžiami visi standartiniai pjezoelektrinių sistemų uždaviniai.

Baigtinių elementų metodas yra vienas populiariausių ir efektyviausių inžinerinių metodų sudėtingoms kompleksinėms struktūroms modeliuoti bei tirti. Jis pradėtas vartoti penkto dešimtmečio pradžioje statybinės mechanikos specialistų, gal todėl ir šiandien naudojama terminologija siejama su deformuojamo kūno mechanikos pavadinimais. Mažų poslinkių teorema tapo baigtinių elementų metodo vystymosi pagrindu, nes konstrukcijų analizė poslinkių metodu buvo ir tebelieka populiari. Kai konstrukcija turi sudėtingą geometrinę formą bei kraštines sąlygas, analitinis bei eksperimentinis tyrimai tampa techniškai sudėtingi. Taikant baigtinių elementų metodą, kai tiriamasis modelis aproksimuojamas baigtinio dydžio elementais, yra atliekamas efektyvus skaitinis tyrimas.

Baigtinių elementų metodo lygtys pjezoelektriniam kūnui, užimančiam tūrį V ir apribotam paviršiumi S, gali būti formuluojamos remiantis variaciniu ekstreminiu arba virtualių darbų principais. Naudojant variacinį ekstreminį principą minimizuojama pjezoelektrinio kūno pilna potencinė (įskaitant ir elektrostatinę) energija (ANSYS, 2009).

Pritaikę potencinės ir elektrostatinės energijos minimumo principą, gaunama pjezoelektrinio baigtinio elemento būvio lygtis:

$$\begin{cases} [K^e]\{u^e\} + [T^e]\{\varphi^e\} = \{F^e\} \\ [T^e]^T\{u^e\} + [S^e]\{\varphi^e\} = \{Q^e\} \end{cases}, \tag{2.10}$$

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:

$$[K^e] = \int_V [B_u]^T [c^E][B_u]\, dV, \tag{2.11}$$

$$[T^e] = \int_V [B_u]^T [e]\left[B_\phi\right] dV, \tag{2.12}$$

$$[S^e] = \int_V \left[B_\phi\right]^T [\varepsilon^\epsilon]\left[B_\phi\right] dV, \tag{2.13}$$

čia $[c^E]$, $[\varepsilon^\epsilon]$, $[e]$ – 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 įvertinus slopinimą turi tokią išraišką (ANSYS, 2009):

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

čia $[M]$, $[C]$ - atitinkamos konstrukcijos masių ir slopinimo matricos. Šios matricos turi tokias išraiškas (Джагупов, 1986):

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

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K], \quad (2.16)$$

čia ρ – medžiagos tankis; α ir β – proporcingumo koeficientai. Jeigu sistemos dinamiškumo koeficientas, atitinkantis virpesių kampinį dažnį ω, yra žinomas ir lygus μ_d, tai koeficientų α ir β išraiškos yra tokios:

$$\begin{aligned}\alpha&=\frac{\omega}{\mu_d},\\ \beta&=0.\end{aligned} \quad (2.17)$$

Bendru atveju pjezokeitiklio savieji dažniai ir formos, nevertinant slopinimo, gali būti gaunami išsprendus matricinių lygčių sistemos tikrinių reikšmių uždavinį:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{\dot{u}\}+[T]\{\phi\}=\{0\}, \quad (2.18)$$

$$[T]^T\{u\}-[S]\{\phi\}=\{0\}. \quad (2.19)$$

Pertvarkius lygtis (2.18) ir (2.19), gauname savųjų reikšmių lygtį:

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

Lygtis (2.18) turi du sprendinius, kurie gali būti lygūs nuliui. Netrivialus sprendinys randamas išsprendus sekančią lygtį:

$$det([K^*]-\omega^2[M])=\{0\}, \quad (2.\ 21)$$

čia $[K^*]$ matricos išraiška priklauso nuo mazginių potencialų vektoriaus reikšmių, kurias įtakoja elektrodų konfigūracija. Apibrėždami matricą $[K^*]$, išskirsime du galimus bendriausius elektrodų išdėstymo atvejus. Pirmasis atvejis, kai pjezokeitiklis pilnai padengtas elektrodais ir visi mazgai turi nenulines elektros krūvio reikšmes, antrasis – kai dalis pjezokeitiklio mazgų, t. y. vidiniai mazgai ir pjezokeitiklio paviršiaus elementų, nepadengtų

elektrodais, mazgai, turi nulinį elektros krūvį. Pirmuoju atveju gaunama tokia $[K^*]$ matricos išraiška:

$$[K^*] = [K] + [T][S]^{-1}[T]^T. \tag{2.22}$$

Antruoju atveju pjezokeitiklio mazginių potencialų vektorius $\{\phi\}$ padalinamas į du mazginių potencialų subvektorius: su nenuliniais elektros krūviais $\{\phi_1\}$ ir nuliniais elektros krūviais $\{\phi_2\}$, įskaitant paviršinius, elektrodų neturinčius mazgus. Elektrinių krūvių vektorius $\{Q\}$, įvertinus mazginių potencialų vektoriaus sudalijimą, yra skaidomas į užduotų nenulinių krūvių subvektorių $\{Q_1\}$ ir nulinių krūvių subvektorių $\{Q_2\}$, kuris apibrėžia nepadengtas elektrodais pjezokeitiklio dalis. Tuomet elektromechaninė ir talpinė matricos skaidomos į atitinkamus blokus ir turi tokias išraiškas:

$$[T] = [T_1 \quad T_2], \tag{2.23}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}. \tag{2.24}$$

Šiuo atveju $[K^*]$ matricos išraiška, esant trumpam jungimui elektroduose ($\phi_1 = 0$), turi tokią išraišką (ANSYS, 2009):

$$[K^*] = [K] + [T_2][S_{22}][T_2]^T. \tag{2.25}$$

Kai pjezokeitiklio elektrodai atviri ($Q_1 = 0$), matricos $[K^*]$ išraiška gaunama tokia pati kaip ir (2.22), nes tuo atveju mazginių potencialų vektoriaus skaidymas į subvektorius netenka prasmės. Reikia pasakyti, kad lygybėje (2.25) standumo matricos $[K]$ norma žymiai viršija antrojo nario (matricų sandaugos) matricos normą ir mažai įtakoja savųjų dažnių skaičiavimuose, tačiau ignoruoti šio nario negalima, nes tuo atveju nukentėtų skaičiavimų tikslumas. Išsprendus savųjų reikšmių uždavinį, yra nustatomi pjezokeitiklio savieji dažniai ir savosios formos, kurie naudojami tolesniuose skaičiavimuose.

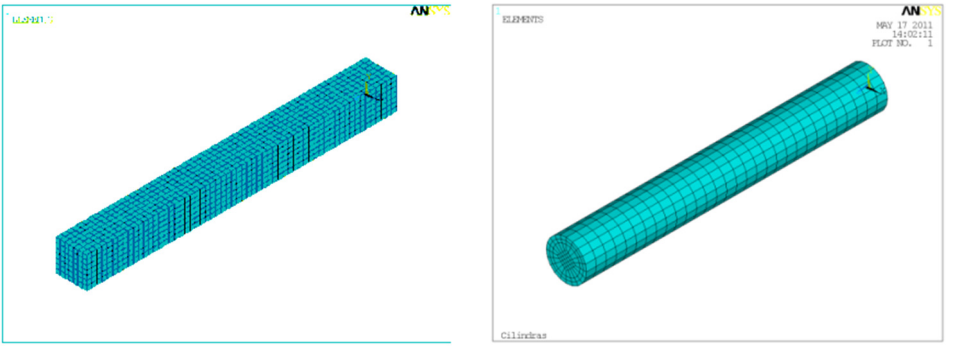
Sudarant realiai veikiančių pjezokeitiklių baigtinių elementų modelius, paprastai vidiniai mazgai ir elektrodais nepadengti paviršiniai mazgai turi nulinį elektros krūvį. Todėl, modeliuojant tokius pjezokeitiklius, yra naudojamos aukščiau minėtos pergrupuotos struktūrinės matricos ir vektoriai. Dažnai tokiems pjezokeitikliams taikomos sekančios kraštinės sąlygos: įtvirtinimo mazguose poslinkiai lygūs nuliui $\{u_s\} = 0$ ir mazginių apkrovų vektorius lygus nuliui $\{F\} = 0$. Tada konstrukcijos dinamikos lygtis užrašoma sekančiai (ANSYS, 2009):

$$\begin{aligned} [M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} + [T_1]\{\phi_1\} + [T_2]\{\phi_2\} = 0, \\ [T_1]^T\{u\} - [S_{11}]\{\phi_1\} - [S_{12}]\{\phi_2\} = \{Q_1\}, \\ [T_2]^T\{u\} - [S_{12}]^T\{\phi_1\} - [S_{22}]\{\phi_2\} = \{0\}. \end{aligned} \tag{2.26}$$

Sistemoje (2.26) esantys nariai $[T_1]\{\phi_1\}$ ir $[T_2]\{\phi_2\}$ reiškia ekvivalentines mazginės jėgas, sąlygotos potencialų $\{\phi_1\}$ ir $\{\phi_2\}$. Kai daugiamačių pjezokeitiklių paviršius pilnai padengtas elektrodais ir maitinimo šaltinis yra tiek galingas, kad užtikrina nustatytas potencialų reikšmes, pakanka nagrinėti tik pirmąją sistemos (2.26) lygtį. Tuomet gauname įprastinio pavidalo konstrukcijos dinamikos lygtį su duotu mazginių jėgų vektoriumi dešinėje pusėje :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[T_1]\{\phi_1\} - [T_2]\{\phi_2\}. \qquad (2.27)$$

Tokio pavidalo pjezokeitiklio dinamikos lygtis yra paprastai naudojama daugiamačių pjezokeitiklių skaičiavimuose.



a) b)

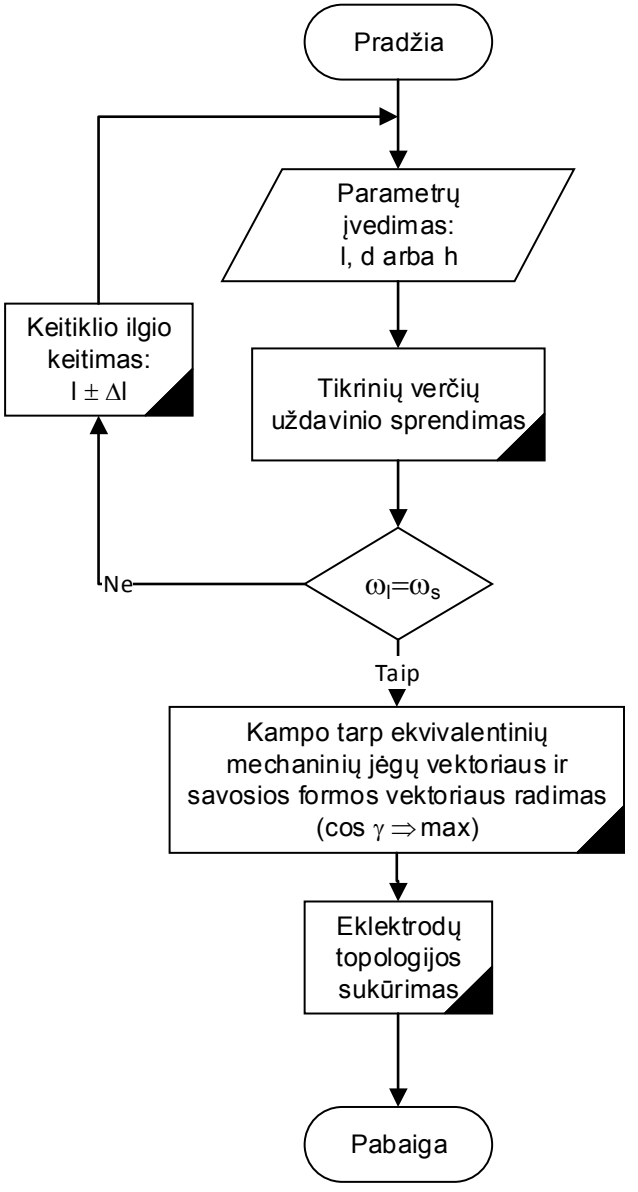
2.6 pav. Dviejų poliarizacijos vektorių krypčių (a) ir radialines poliarizacijos (b) keitiklių baigtinių elementų modeliai

Fig. 2.6. Finite element model of the piezoelectric actuator of two directions of polarization vector (a) and radial polarization (b)

Matematiniam modeliavimui buvo naudojama ANSYS v.11 programinė aplinka. Diskretizavimui buvo naudojamas SOLID5 baigtinių elementų tipas (ANSYS, 2009). Nagrinėjamame modelyje buvo daroma prielaida, kad pjezokeitikliai yra homogeniniai ir idealios poliarizacijos. Keitiklių skaitiniai modeliai sukurti ANSYS aplinkoje pateikiami 2.6 paveiksle.

2.3. Keitiklių elektrodų topologijos

Tikrinių reikšmių uždavinio sprendimo rezultatai buvo panaudoti keitiklio konstrukcijos nustatymui. Kadangi elektrodų topologija turi įtakos visos sistemos standumui, pirmiausiai buvo nustatoma elektrodų topologija (2.7 pav.).



2.7 pav. Keitiklių elektrodų topologijos nustatymo algoritmas
Fig. 2.7. Algorythm for electrode topologyof actuator estimation

Formuluojant daugiamačių pjezokeitiklių elektrodų topologijos uždavinį, atsižvelgiama į įrenginiams keliamus konstrukcinius reikalavimus tokius kaip: unifikuoti žadinančią įtampą, gauti reversinį judesį bei pasiekti pjezokeitiklio maksimalų naudingo veiksmo koeficientą. Taigi konstrukciniai reikalavimai suformuluoja uždavinio apribojimus, kurie, kaip matysime toliau, stipriai susiaurina paieškos sritį. Norint skaitiškai nustatyti elektrodų konfigūraciją, pjezokeitiklio elektrodų paviršius turi būti diskretizuotas baigtinio dydžio ploteliais. Todėl žadinimo įtampos poliškumas plotelio svorio centre yra laikomas parametru.

Įtampos poliškumo ženklas ploteliuose randamas sprendžiant uždavinį, kai maksimizuojamas pjezokeitiklio atliekamas efektyvųjį darbas A_k^{ef}, žadinant norimos formos virpesius. Elektrodo plotelio dydis priklauso nuo uždavinio diskretizacijos tinklelio tankumo. Kadangi skaitinis modelis paremtas baigtinių elementų metodu, todėl elektrodo ploto dydis sutampa su baigtinio elemento plotu. Uždavinys užrašomas taip:

$$\begin{cases} A_k^{ef}(\phi) \Rightarrow max; \\ \{\phi^e\} = \{W^e\} sg^e sin(\omega_k t), kur\ sg^e = \begin{cases} +1 \\ -1 \end{cases}, \\ \phi_i \neq 0. \end{cases} \tag{2.28}$$

čia

$$A_k^{ef} = \frac{\omega_k}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_k}} \{y_k\}^T \{R\} z_k dt = \frac{\omega_k}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_k}} \{y_k\}^T [T] \{\phi\} z_k dt, \tag{2.29}$$

čia $\{W\}$ – žadinimo įtampos amplitudžių vektorius, ω – savasis dažnis, t – laikas, $\{R\}$ – mechaninių jėgų vektorius, T – elektromechaninė matrica, $\{z\}$ – savųjų formų svorinių koeficientų vektorius, $\{y\}$ – savosios formos vektorius.

Įvertinus apribojimus, uždavinio kriterijus užrašomas taip:

$$cos\gamma_k^e \Rightarrow max, \tag{2.30}$$

čia

$$cos\gamma_k^e = \frac{\{y_k^e\}^T \{R_a^e\}}{|y_k^e||R_a^e|}. \tag{2.31}$$

Įvertinus apribojimus ir prielaidas, efektyvus darbas A_k^{ef} priklauso tik nuo $cos\gamma_k^e$ reikšmės, todėl pjezokeitiklių elektrodų konfigūraciją randame minimizuodami kampą tarp ekvivalentinių mechaninių jėgų vektoriaus ir savosios formos vektoriaus. Kampą y_k^e galima keisti, tik keičiant ekvivalentinių mechaninių jėgų vektoriaus kryptį, nes konkrečios savosios formo vektoriaus kryptis yra pastovi. Tai atliekama, pakeičiant žadinimo įtampos poliškumą.

Formuluojant uždavinį, buvo priimti konstrukciniai reikalavimai, pagal kuriuos visas pjezokeitiklio paviršius yra pilnai padengtas elektrodais, todėl $cos\gamma_k^e$ ženklas apibrėžia visų paviršiaus elementų žadinančios įtampos poliškumą. Atlikus skaičiavimus, $cos\gamma_k^e$ ženklas apibrėžia pjezokeitiklių elektrodų konfigūraciją. Maksimalios virpesių amplitudės, pasiekiamos tada, kai sg^e reikšmė sutampa su $cos\gamma_k^e$ ženklu.

2.3.1. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos kryptimis elektrodų topologija

Elektrodų topologiją 3-ios skersinių virpesių formos bei 1-mos savosios išilginės formos virpesiams žadinti rasta pasitelkus tikrinių reikšmių uždavinio sprendimo rezultatais: elementariaisiais mazgų poslinkiais atitinkamų koordinačių ašių atžvilgiu.

Pasirinktos topologijos keitiklio tikrinių reikšmių uždavinio sprendimo rezultatai pateikiami 2.3 lentelėje, kur pateikiami tikriniai dažnai ir jų formos. Reikėtų paminėti, kad konstrukcija yra simetrinė, taigi tikriniai dažniai virpesiams skirtingose plokštumose sutampa.

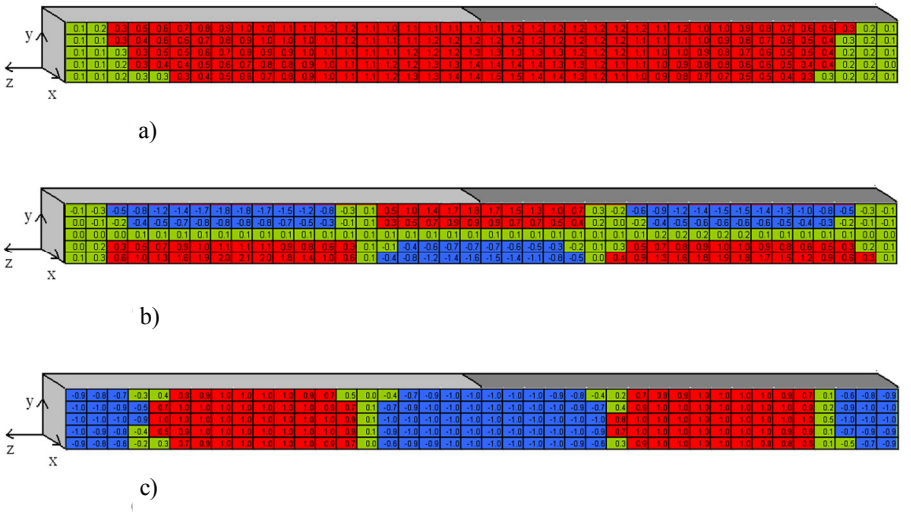
2.3 lentelė. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis svyravimo formos ir jų dažniai
Table 2.3. Oscillation modes and frequencies of the piezoelectric actuator with two polarization vector directions

Tikrinė forma	Dažnis f_r, Hz
I skersinė	7254
II skersinė	19020
III skersinė	34559
I išilginė	35341

Kiekvienam keitiklio skaitinio modelio elementariajam tūriui buvo apskaičiuoti jo poslinkio vektoriaus kampas pasirinktoje svyravimų plokštumoje ir elementarus elemento briaunų ilgių pokytis. Šių dviejų parametrų loginės sandaugos rezultatai pateikti 2.8 paveiksle.

Žalia spalva pažymėtos vietos su mažiausiais poslinkio skirtumais; mėlyna spalva pažymėti elementai su didžiausiais neigiamais poslinkiais ir raudonai pažymėti elementai su didžiausiais teigiamais poslinkiais. Taigi, mėlyna spalva rodo, kad elementai traukiasi svyravimo krypties atžvilgiu, o raudona spalva rodo, kad šie elementai plečiasi svyravimo krypties atžvilgiu. 2.8 paveiksle

matome, kad 1-os išilginės formos atveju visas keitiklis traukiasi (arba plečiasi) kiekviename keitiklio elementariajame elemente, bet centrinė keitiklio dalis yra aktyvesnė, t. y. centrinės dalies žadinimas turės didžiausią įtaka keitiklio išilginiams virpesiams.



2.8 pav. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis racionali elektrodų konfigūracija: a) 1-mos išilginės formos išilginiams virpesiams generuoti; b) 3-čios lenkimo formos virpesiams generuoti, kai poliarizacijos vektoriaus kryptis statmena svyravimų plokštumai; c) 3-čios lenkimo formos virpesiams generuoti, kai poliarizacijos vektoriaus kryptis lygiagreti svyravimų plokštumai.

Fig. 2.8. The pattern of electrodes of the bipolar actuator for 1st longitudinal mode (a), for and 3rd flexural mode then polarization vector is perpendicular to oscillation plane (b) and 3rd flexural mode then polarization vector is parallel to oscillation plane (c)

Elektrodas, esantis arčiausiai antrojo svyravimo pusbangio mazgų, virpesiams turi mažiausiai įtakos. Kadangi keitiklis turėtų svyruoti ne tik vienoje plokštumoje, bet ir jai statmenoje, t. y. *xOz* ir *yOz*, keitiklio perimetras buvo padalintas į keturias lygias dalis, o ilgis į tris zonas, kur: pirmoji nuo 0 iki 0,356; antroji nuo 0,356 iki 0,644; ir trečioji nuo 0,644 iki 1 keitiklio ilgio dalies.

2.3.2. Pjezoelektrinio keitiklio su radialine poliarizacijos vektorių kryptimi elektrodų topologija

Remiantis tikrinių reikšmių uždavinio rezultatais buvo ieškoma racionalios keitiklio konstrukcijos. Tikslai, kuriuos reikėjo pasiekti: tai rasti atitinkamą keitiklio geometriją, t. y. ilgio l ir skersmens D santykį; ir rasti tinkamą

elektrodų topologiją 3-čios savosios lenkimo formos bei 1-mos savosios išilginės formos virpesiams žadinti. Kadangi elektrodų topologija turi įtakos visos sistemos standumui, pirmiausiai buvo ieškoma optimaliausios elektrodų topologijos.

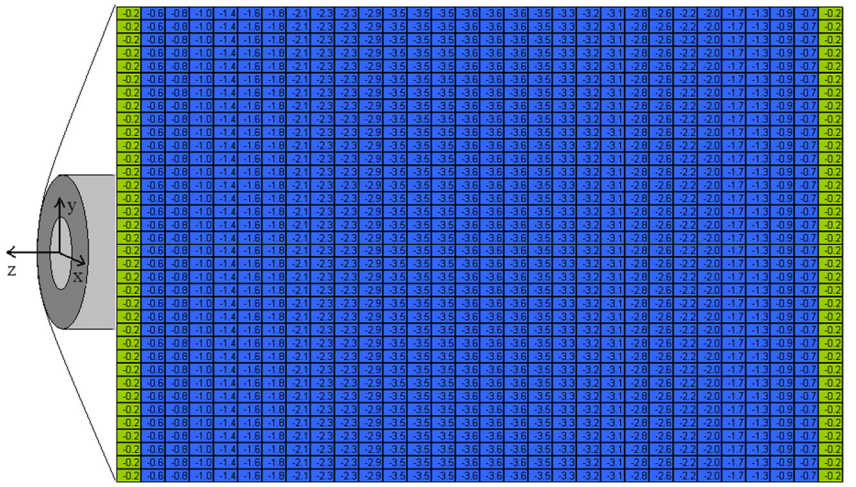
Pasirinktos topologijos keitiklio savųjų formų 2.4 lentelėje pateikti tikrinių virpesių formų tikriniai dažniai. Todėl, reikėtų paminėti, kad konstrukcija yra visiškai simetrinė, taigi rezonansiniai tikrinių formų dažniai virpesiams skirtingose plokštumose sutampa.

2.4 lentelė. Radialinės poliarizacijos keitiklio svyravimo formos ir jų dažniai
Table 2.4. Oscillation modes and frequencies of the piezoelectric actuator of radial polarization

Tikrinė forma	Dažnis f_r, Hz
I lenkimo	13793
II lenkimo	35889
III lenkimo	65250
I išilginė	65639

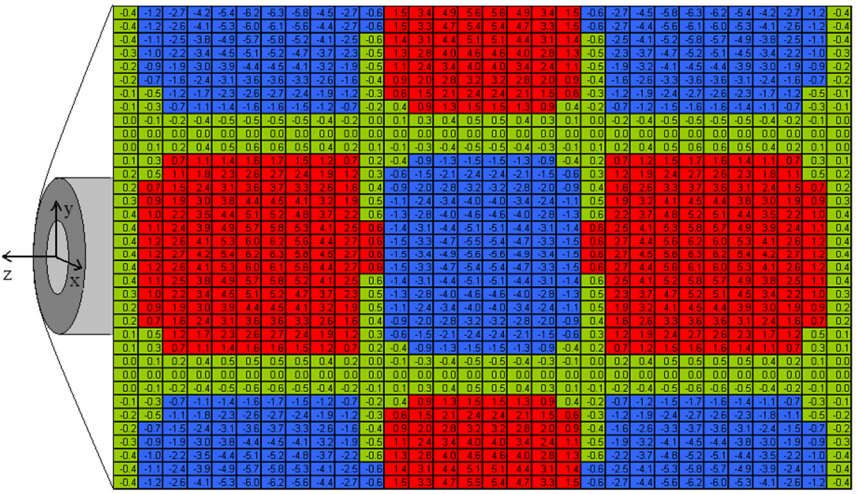
Šiam tikslui pasiekti buvo naudojamasi tikrinių reikšmių uždavinio rezultatais: elementariaisiais mazgų poslinkiais atitinkamų koordinačių ašių atžvilgiu. Kiekvienam keitiklio skaitinio modelio elementariajam tūrio vienetui (baigtiniam elementui) buvo apskaičiuoti jo poslinkio vektoriaus kampas pasirinktoje svyravimų plokštumoje ir elementarus elemento briaunų ilgių pokytis. Šių dviejų parametrų loginės sandaugos rezultatai pateikti 2.9 ir 2.10 paveiksluose. Žalia spalva pažymėtos vietos su mažiausiais poslinkio skirtumais; mėlyna spalva pažymėti elementai su didžiausiais neigiamais poslinkiais ir raudonai pažymėti elementai su didžiausiais teigiamais poslinkiais. Taigi, mėlyna spalva rodo, kad elementai susispaudė svyravimo krypties atžvilgiu, o raudona spalva rodo, kad šie elementai išsiplėtė svyravimo krypties atžvilgiu. 2.9 paveiksle matome, kad pirmos išilginės formos atveju visas keitiklis traukiasi (arba plečiasi) kiekviename keitiklio elementariajame elemente, bet centrinė keitiklio dalis yra aktyvesnė. Tuo remiantis galime teigti, kad žadinant centrinę pjezokeitiklio zoną, bus gauta didžiausia įtaka keitiklio išilginių virpesių žadinimui.

2.10 paveiksle matome, kad „raudonas“ ir „mėlynas“ zonas reikia žadinti skirtingos fazės signalais. Kai viena keitiklio dalis plečiasi, o esanti priešais – traukiasi. Svyruojant strypui 3-čiaja lenkimo savąja forma virpesiams įtakos turi visos keitiklio zonos. Žaliosios zonos rodo, kad keitiklio dalis esanti arčiausiai antrojo svyravimo pusbangio mazgų, virpesiams turi mažiausiai įtakos.



2.9 pav. Radialinės poliarizacijos keitiklio elektrodų konfigūracija 1-mos išilginės formos išilginiams virpesiams generuoti

Fig. 2.9. The pattern of electrodes of the cylindrical actuator for excitation of longitudinal oscillations of 1st longitudinal mode



2.10 pav. Radialinės poliarizacijos keitiklio optimali elektrodų konfigūracija 3-čios lenkimo formos virpesiams generuoti

Fig. 2.10. The pattern of electrodes of the cylindrical actuator for excitation of bending oscillations of 1st flexural mode

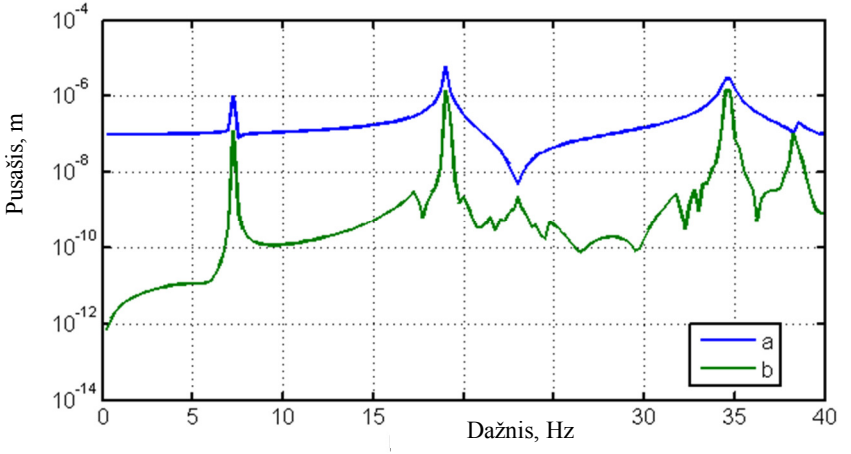
Keitiklis turi svyruoti ne vienoje plokštumoje, bet ir jai statmenose xOz ir yOz plokštumose. Todėl keitiklio šoninis paviršiuss buvo padalintas į keturias lygias dalis išilgine kryptimi, o ilgis į tris zonas skersine kryptimi: pirmoji nuo 0 iki 0,356; antroji nuo 0,356 iki 0,644; trečioji nuo 0,644 iki 1 keitiklio ilgio dalies.

2.4. Pjezokeitiklių harmoninių virpesių analizė

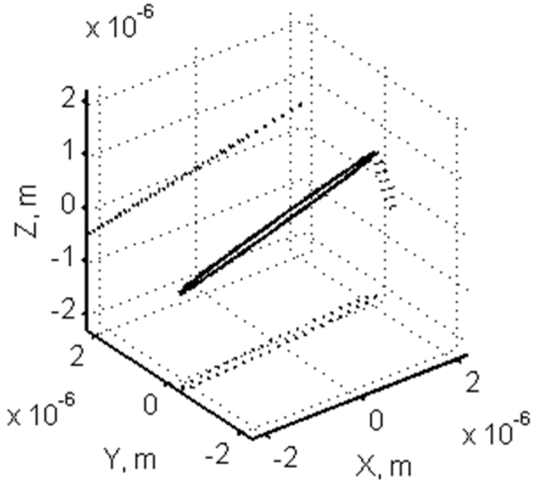
Buvo nagrinėjami neįtvirtintų pjezoelektrinių keitiklių atvejai. Elektrodai buvo formuojami grupuojant keitiklio modelio mazgus ir jiems priskiriant žadinimo ir įžeminimo įtampas.

2.4.1. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos kryptimis kontaktinio taško trajektorijų formavimas esant skirtingoms elektrodų žadinimo schemoms

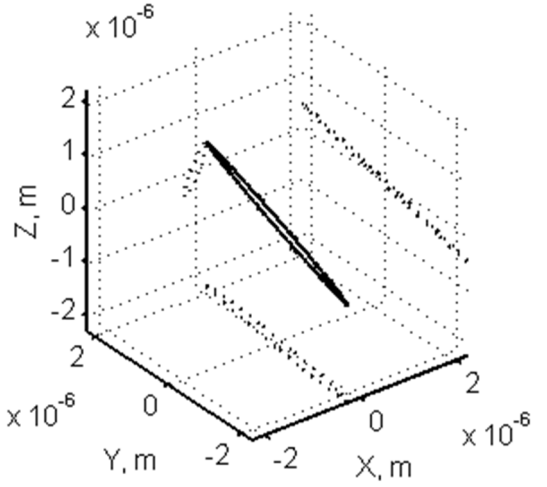
Antrame etape buvo atlikta keitiklio modelio harmoninė analizė diapazone nuo 0 iki 80 kHz, 50 Hz žingsniu. Naudojama žadinimo įtampa U = 100 V, o įžeminimo įtampa U = 0 V. Gauti rezultatai pateikiami 2.11 paveiksle elipsinių trajektorijų didžiosios ir mažosios pusašių priklausomybės nuo dažnio pavidale. Pavyzdyje matomi pikai, iš kurių pirmi du priklauso I, II lenkimo savosioms formoms, trečias pikas atitinka I išilginiam rezonansui, o ketvirtas – III lenkimo rezonansui.



2.11 pav. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis elipsinių trajektorijų didžiojo ir mažojo pusašių priklausomybė nuo žadinimo dažnio
Fig. 2.11. Dependence of the length of major and minor semi axes of elliptical trajectory of contact point of actuator with two polarization directions on excitation frequency



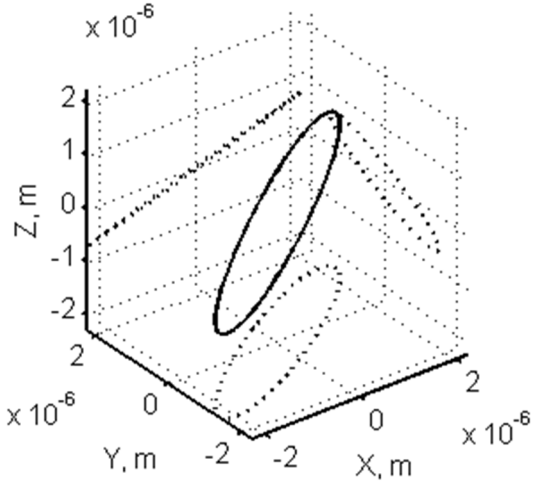
2.12 pav. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis apskaičiuota kontaktinio taško trajektorija žadinant žadinimo schema Nr. 1 (34,8 kHz)
Fig. 2.12. Simulated trajectories of contact point of actuator with two polarization directions under excitation scheme No. 1 (34.8 kHz)



2.13 pav. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis apskaičiuota kontaktinio taško trajektorija žadinant žadinimo schema Nr. 2 (34,8 kHz)
Fig. 2.13. Simulated trajectories of contact point of actuator with two polarization directions under excitation scheme No. 2 (34.8 kHz)

Toliau nagrinėjami bus tik III lenkimo rezonansai bei greta pastarojo esantis I išilginis rezonansas.

Žadinant keitiklį pirmąja ir antrąja schemomis III-o lenkimo rezonanso metu gauname sekančias trajektorijas, kurios yra pavaizduotos atitinkamai 2.12 ir 2.13 paveiksluose.



2.14 pav. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis apskaičiuota kontaktinio taško trajektorija žadinant žadinimo schemą Nr. 3 (34,8 kHz)
Fig. 2.14. Simulated trajectories of contact point of actuator with two polarization directions under excitation scheme No. 3 (34.8 KHz)

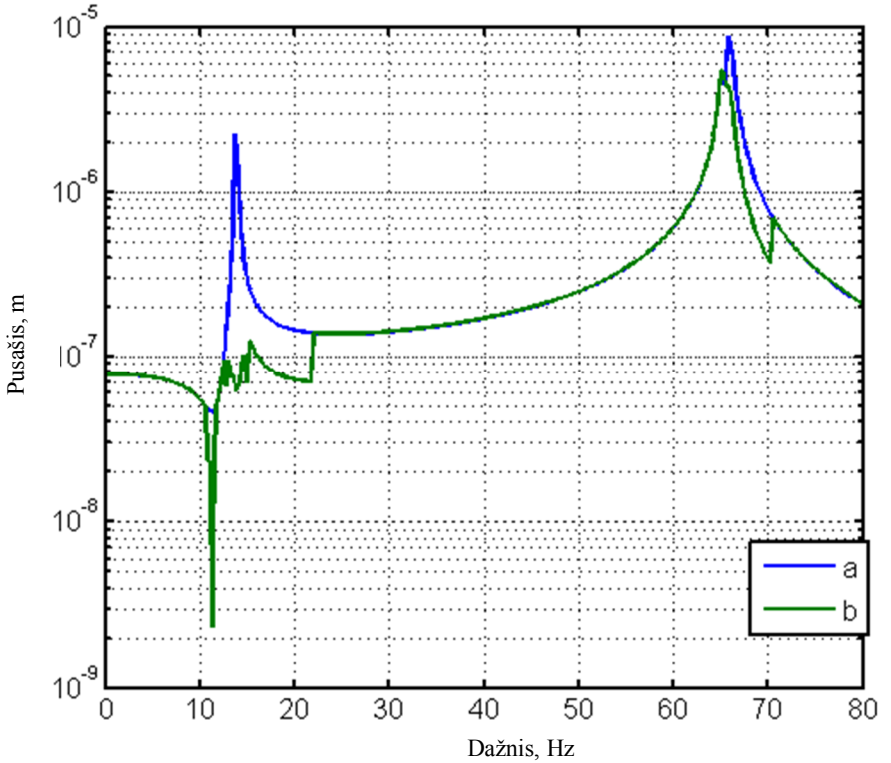
Pateiktuose pavyzdžiuose parodoma, kad žadinant pirmąja schema gauname kontaktinio taško trajektoriją, kurios didžioji ašis yra lygiagreti x-ašiai, o žadinant antrąja schema trajektorija yra lygiagreti y-ašiai.

Atitinkami rezultatai gaunami, kai žadiname trečiąja žadinimo schema (2.14 pav.).

2.4.2. Pjezoelektrinio keitiklio su radialine poliarizacijos vektorių kryptimi kontaktinio taško trajektorijų formavimas esant skirtingoms elektrodų žadinimo schemoms

Buvo atlikta keitiklio su radialine poliarizacija modelio harmoninė analizė ir suskaičiuotos virpesių charakteristikos, t. y. amplitude ir fazė, diapazone nuo 0 iki 80 kHz, 50 Hz žingsniu. Žadinimo įtampa U = 10 V, o įžeminimo įtampa U = 0 V. Gauti rezultatai pateikiami 2.15 paveiksle elipsinių trajektorijų didžiosios ir mažosios pusašių priklausomybės nuo dažnio pavidale. Pavyzdyje,

matomi pikai, iš kurių pirmi priklauso I lenkimo savosioms formoms, o paskutinis pikas atitinka I išilginiam ir III lenkimo rezonansui.

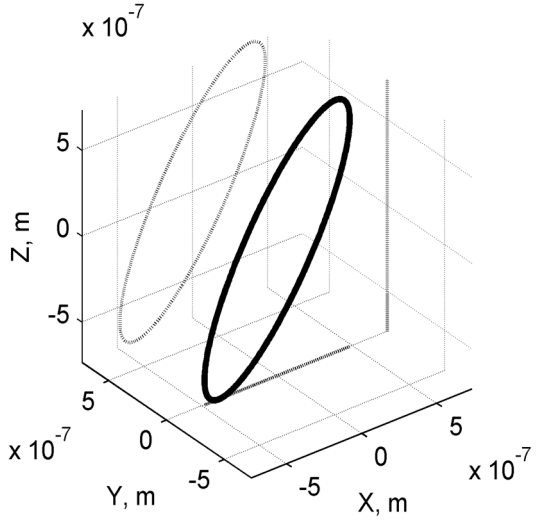


2.15 pav. Radialinės poliarizacijos keitiklio elipsinių trajektorijų didžiojo ir mažojo pusašių priklausomybė nuo žadinimo dažnio

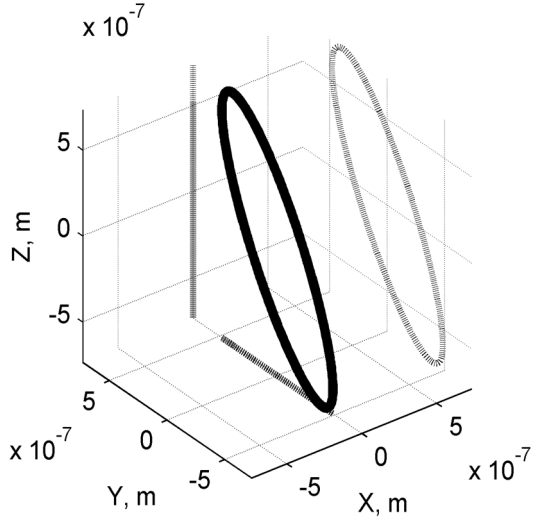
Fig. 2.15. Dependence of the length of major and minor semi axes of elliptical trajectory of contact point of actuator of radial polarization directions on excitation frequency

Toliau bus nagrinėjama tik III skersinių virpesių forma bei greta pastarojo esantis I išilginių virpesių forma.

Žadinant keitiklį pirmąja ir antrąja schemomis III-o lenkimo rezonanso metu gauname sekančias trajektorijas, kurios yra pavaizduotos atitinkamai 2.16 ir 2.17 paveiksluose. Kaip mes matome pateiktuose pavyzdžiuose, žadinant pirmąja schema gauname kontaktinio taško trajektoriją, kurios didžioji ašis yra lygiagreti x-ašiai, o žadinant antrąja schema trajektorija yra lygiagreti y-ašiai.

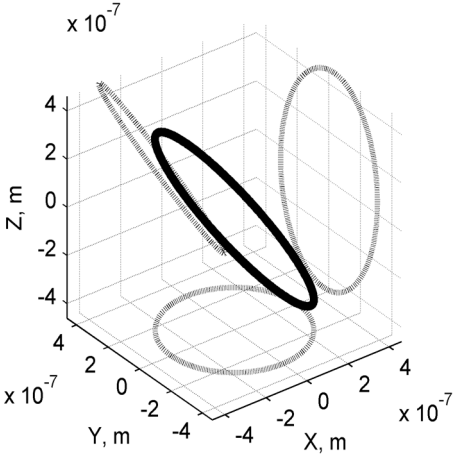


2.16 pav. Apskaičiuota keitiklio su radialine poliarizacija kontaktinio taško trajektorija žadinant žadinimo schema Nr. 1 (74,3 kHz)
Fig. 2.16. Simulated trajectories of contact point of actuator of radial polarization directions under excitation scheme No. 1 (74.3 kHz)



2.17 pav. Apskaičiuota keitiklio su radialine poliarizacija kontaktinio taško trajektorija žadinant žadinimo schema Nr. 2 (74,3 kHz)
Fig. 2.17. Simulated trajectories of contact point of actuator of radial polarization directions under excitation scheme No. 2 (74.3 kHz)

Žadinant keitiklį trečiąja žadinimo forma gaunama erdvinė trajektorija, sukamajam rotoriaus judesiui formuoti (2.18 pav.). Elipsės viršūnė yra nutolusi nuo centro pakankamu atstumu, kad gautume jėgos momentą galintį pasukti rotorių.



2.18 pav. Apskaičiuota keitiklio su radialine poliarizacija kontaktinio taško trajektorija žadinant žadinimo schema Nr. 3 (74,3 kHz)
Fig. 2.18. Simulated trajectories of contact point of actuator of radial polarization directions under excitation scheme No. 3 (74.3 kHz)

Iš pavyzdžių taipogi matosi išilginių svyravimų amplitudžių skirtumai, kurie priklauso nuo žadinamų elektrodų kiekio. Kuo didesnį keitiklio plotą žadiname tuo suteikiame daugiau energijos, tuo didesnės yra svyravimų dedamosios.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje pateikiama prielaida, kad kelių poliarizacijos vektoriaus krypčių pjezoelektrinio keitiklio strypo formos keitiklio konstrukcija generuoja daugiakomponenčius virpesius, kuriuos galima pritaikyti daugelio laisvės laipsnių slankiklio judesiams kurti. Nagrinėjami du pjezoelektrinių keitiklių modeliai: keitiklis su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis ir keitiklis su radialine poliarizacija. Gauti sekantys rezultatai:

1. Analitiškai apskaičiuota keitiklių geometrija leisianti keitikliams svyruoti pirma tikrine išilginių virpesių forma ir trečia tikrine skersine forma esant tam pačiam tikriniam dažniui. Dviejų poliarizacijos vektoriaus krypčių pjezokeitiklio ilgio ir skersmens santykis yra 9,9x1, o radialinės poliarizacijos keitikliui – 8,5x1.

2. Nustatytas keitiklių elektrodų topologijos paieškos algoritmas. Šis algoritmas leidžia apskaičiuoti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos keitiklių elektrodų topologiją ir pritaikyti atitinkamą žadinimo schemą, kad keitiklio virpesiai formuotų kontaktinio taško elipsines trajektorijas trijose statmenose plokštumose.

3. Skaitinio tyrimo rezultatai patvirtino skyriaus pradžioje pateiktas prielaidas, kad abu keitiklių modeliai formuoja elipsines trajektorijas trijose plokštumose.

Dviejų poliarizacijos vektoriaus krypčių pjezokeitiklis žadinamas 34,8 kHz dažniu generavo kontaktinio taško trajektorija, kurios plokštumą:

- nukrypusi nuo *xOz* plokštumos 4°, kai žadinami *xOz* virpesiai;
- nukrypusi nuo *yOz* plokštumos 5°, kai žadinami *yOz* virpesiai;
- nukrypusi nuo *xOy* plokštumos 34°, kai žadinami *xOy* virpesiai.

Radialinės poliarizacijos pjezokeitiklis žadinamas 74,3 kHz dažniu generavo kontaktinio taško trajektorija, kurios plokštumą:

- nukrypusi nuo *xOz* plokštumos 0°, kai žadinami *xOz* virpesiai;
- nukrypusi nuo *yOz* plokštumos 0°, kai žadinami *yOz* virpesiai;
- nukrypusi nuo *xOy* plokštumos 35°, kai žadinami *xOy* virpesiai.

3

Eksperimentinis keitiklių tyrimas

Šio tyrimo tikslas – eksperimentiškai patvirtinti skaitinio modeliavimo rezultatus.

Skyriuje aprašomas pjezoelektrinių keitiklių prototipų gamybos procesas. Nors abiejų keitiklių gamybai buvo panaudoti pramoniu būdu gaminami pjezoelektriniai komponentai, bet dėl kiekvienos konstrukcijos savitumo buvo naudojamos skirtingos gamybos technologijos. Cilindrinio radialinės poliarizacijos keitiklio gamyba buvo paprastesnė, bet reikalavo aukštesnės precizikos dėl mažesnių keitiklio matmenų. Dviejų poliarizacijos vektoriaus krypčių keitiklio gamyba buvo žymiai sudėtingesnė ir pareikalavo papildomų pasiruošimo darbų t. y. teko gaminti keramikos poliarizatorių.

Eksperimentų metu buvo matuojamos keitiklio elektrinės savybės, t. y. tariamosios varžos priklausomybė nuo žadinimo dažnio. Pirmiausiai buvo matuojamos keitiklių kompleksinės varžos priklausomybės nuo dažnio. Žadinimo schemos buvo parenkamos tokiu būdu, kad gaunamas rezultatas atspindėtų lenkimo, išilginių ir mišrių svyravimų elektrines savybes, o atliekant svyravimų trajektorijos matavimus – atitinkamai, kaip skaitinio modeliavimo metu. Taip pat buvo atlikti keitiklio mechaninių svyravimų matavimai. Atskirame poskyryje kalbama apie keitiklių virpesių matavimo stendo paruošimą. Buvo išmatuotos keitiklių kontaktinių taškų trajektorijos naudojant skirtingas žadinimo schemas.

Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Hemsel, T.; Bansevičius, R. 2010), (Mažeika, D.; Lučinskis, R.; Bansevičius, R. 2011), (Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Daukševičius, R. 2011), (Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Hemsel, T.; Bansevičius, R. 2012) ir (Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Bansevičius, R. 2013).

3.1. Pjezoelektrinių keitiklių prototipų gamyba

Pjezoelektrinių keitiklių gamybos sudėtingumo lygis priklauso nuo visos virpamosios sistemos geometrinės formos, naudojamų pjezokeitiklių skaičiaus, pjezoelektrinio keitiklio geometrijos, poliarizacijos krypties ir elektrodų topologijos. Darbe nagrinėjami keitikliai yra paprastos geometrinės formos, todėl šių keitiklių prototipų gamybos sudėtingumas priklauso tik nuo to, kaip sudėtinga pagaminti pjezoelektrinius elementus.

Pjezokeramikos gamybos procesas yra ilgas ir sudėtingas procesas, tačiau šiam eksperimentiniam tyrimui buvo panaudoti pramoniniu būdu gaminami pjezoelektrinės keramikos elementai. Tai žymiai supaprastino prototipų gamybos procesą.

3.1.1. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektorių kryptimis gamyba

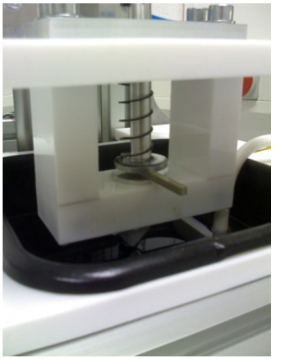
Keitiklio gamybai buvo panaudotos PIC 255 pjezokeraminės plokštelės. Plokštelės matmenys 50x30x4 mm. Plokštelės poliarizacija statmena didžiajam paviršiui. Tam, kad gauti 4x4x39,9 mm matmenų strypą, kuris turėtų dvi poliarizacijos kryptis, teko atlikti sekančius gamybos etapus:

1. Pjaustymas. Plokštelė buvo supjaustyta išilgai jos ilgiausio matmens į kvadratinio skerspjūvio 4x4x50 strypus. Buvo pjaustoma deimantiniu 5 cm skersmens disku. Disko apsisukimų dažnis – 8000 aps/min, pjovimo greitis – 3 mm/min.
2. Šlifavimas. Gauti ruošiniai buvo šlifuojami iki 4x4 mm skerspjūvio matmenų, 0,1 mm tikslumu.
3. Depoliarizacija. Depoliarizacija buvo atliekama kaitinant pjezoelementus iki temperatūros viršijančios pjezomedžiagos Kiurį temperatūrą. Mūsų naudotos PIC 255 keramikos atveju iki 400 °C.
4. Poliarizavimas. Poliarizavimas buvo atliekamas paruoštame specialiame stende (3.2 pav.). Keitiklio dalis (pusė) patalpinama tarp elektrodų ir panardinama į įkaitintą iki 100 °C nelaidžią alyvą. Palaipsniui didinama įtampa iki 2500 V/mm (10 kV visam keitiklio storiui). Įtampa keliama

laipsniškai 10 min intervale, 10 min palaikoma maksimali įtampa ir vėliau 5 min eigoje sumažinama iki 0 V.



a)



b)



c)

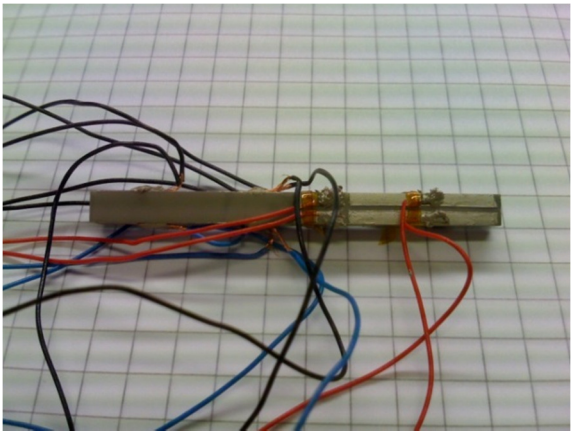


d)

3.2 pav. Poliarizavimo stendas: a) bendras vaizdas, b) keitiklis tarp elektrodų, c) multimetras (temperatūrai matuoti), d) įtampos šaltinis
Fig. 3.2. Polarization stand: a) general view, b) actuator between electrodes, c) multimeter (for temperature measurement), d) voltage source

5. Padengimas elektrodais. Konstrukcijoje numatyti elektrodai buvo suformuoti padengus keramiką sidabro dažais DS-1. Elektrodai buvo formuojami keitikliui pritaikius elektrodų matricą ir padengus sidabro-epoksidinių dažų sluoksniu. Dažai džiovinami 120 °C temperatūroje 30 min bėgyje.

6. Laidų tvirtinimas. Kadangi naudojama elektrodų medžiagos pagrindas buvo epoksido derva, litavimo pritaikyti nebuvo galima. Laidai buvo klijuojami laidžiais epoksidiniais klijais.



3.1 pav. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis eksperimentinis modelis

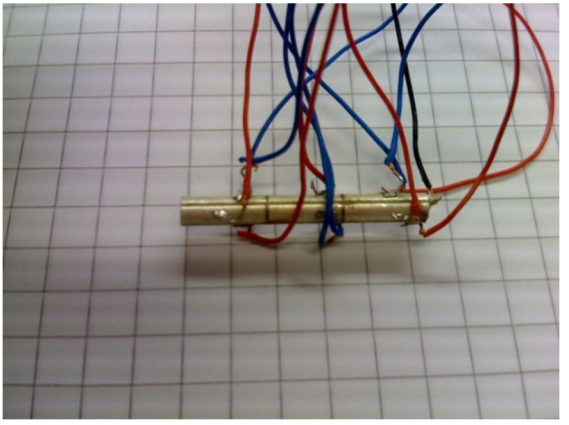
Fig. 3.1. Experimental model of piezoelectric actuator with two polarization vector directions

Eksperimentiniam tyrimui panaudotas keitiklis pavaizduotas 3.1 paveiksle. Keitiklio elektrodai išdėstyti statmenose plokštumose ir yra statmeni poliarizacijos vektoriui. Jie padalinti remiantis gautais skaitiniais rezultatais.

3.1.2. Pjezoelektrinio keitiklio su radialine poliarizacija gamyba

Pagrindinės keitiklio dalys: cilindrinis žalvarinis strypas ir tuščiaviduris pjezoelektrinis keramikinis cilindras. Pjezoelektrinio keitiklio gamybai buvo panaudotas PI Ceramics gamybos pjezokeraminis elementas PT130.00 pagamintas iš PIC151 keramikos. Tai 3,2 mm išorinio, 2,2 mm vidinio skersmens bei 30 mm ilgio pjezokeraminis cilindras. Išorinis ir vidinis cilindriniai paviršiai padengti sidabro elektrodais. Teigiama poliarizacijos kryptis radialinė.

Eksperimentiniam tyrimui naudotas keitiklis pavaizduotas 3.3 paveiksle. Pjezokeitiklio elektrodai buvo formuoti sidabro sluoksnį išdeginant elektros lanku specialiose precizinėse staklėse.

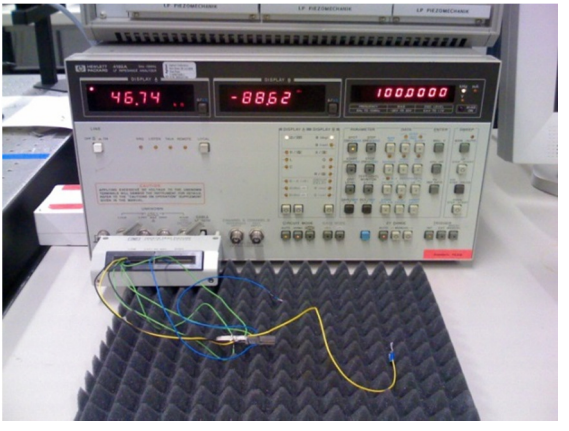


3.3 pav. Eksperimentinis radialinės poliarizacijos keitiklio modelis
Fig. 3.3. Experimental model of actuator of radial polarization

Elektrodų formavimo process buvo lokalus ir nekeitė pjezomedžiagos temperatūros keitiklio tūryje, todėl galime daryti prielaidą, kad elektrodų formavimas pjezokeitiklio poliarizacijos kokybei įtakos neturėjo.

3.2. Pjezokeitiklių tariamosios varžos matavimai

Tam, kad įsitikinti eksperimentinio modelio patikimumu ir matematinio modelio atitikimu impedanso analizatoriumi (3.4 pav.) buvo pamatuotos keitiklių tariamosios varžos ir palygintos su skaitinio modeliavimo rezultatais.



3.4 pav. Tariamosios varžos matavimai impedanso analizatoriumi HP 4192A
Fig. 3.4. Impedance measurements on the impedance analyzer HP 4192A

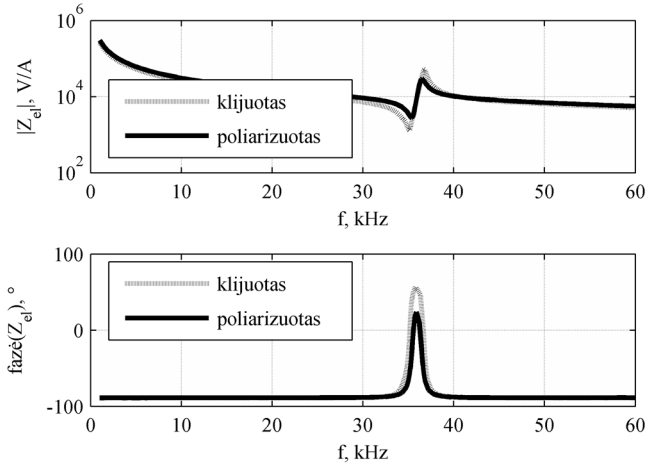
Impedanso analizatorius yra pilnai automatizuotas matavimo instrumentas, gebantis matuoti platų impedanso parametrų spektrą t.y fazę ir vėlinimą. Šis įrenginys leidžia stebėti matuojamus išėjimo ir įėjimo parametrų dydžius ir matavimo dažnį tiesiogiai esančiuose ekranuose ir saugoti matuojamus dydžius kompiuteryje. Analizatoriaus dažnio matavimo ribos yra nuo 5 Hz iki 13 MHz, skiriamąja geba yra 5 mHz. Įtampos amplitudė kinta nuo 5 mV iki 1,1 V, o skiriamoji geba yra 5 mV. Naudojant matavimų rezultatų vidurkinimo funkciją, įrenginys atlieka vieną matavimą per sekundę. Tariamosios varžos matavimo metu įrenginys matuoja impedansą |Z| (nuo 0,1 mΩ iki 1,2999 MΩ) ir fazės poslinkį θ (nuo -180° iki +180°). Visi matuojami dydžiai matuojami 0,1% paklaida.

3.2.1. Dviejų poliarizacijos krypčių pjezokeitiklio dažninė impedanso charakteristika

Prieš atliekant dviejų poliarizacijos krypčių pjezokeitiklio prototipo ir skaitinio modelio rezultatų lyginimą, reikia išspręsti dar vieną uždavinį t. y. įvertinti keitiklio prototipo poliarizacijos kokybę. Uždavinys yra labai keblus. Prieš depoliarizuojant pjezomedžiagą jos savybės ir parametrai buvo gerai žinomi. Gamintojas pateikė visus dydžius. Kadangi, medžiagą teko depoliarizuoti ir poliarizuoti iš naujo, negalima būti tikriems, kad pasiekėme tokią pačią ar lygiaverčią poliarizacijos kokybę. Yra galimi du tokios problemos sprendimo būdai: pirmas – atlikti pjezomedžiagos parametrų matavimus; antras – palyginti su tokios pačios konstrukcijos bet gamintojo poliarizacijos kokybės keitikliu. Pirmas sprendimo būdas yra sudėtingas, nes tam reikalingi tam tikros geometrinės formos ir poliarizacijos krypties bandinių, poliarizuotų tomis pačiomis sąlygomis. Antras atvejis yra paprastesnis. Tereikia pagaminti tos pačios geometrijos keitiklį klijuojant du gamyklinės poliarizacijos strypelius pasuktus taip, kad poliarizacijos kryptys būtų statmenos viena kitai ir išilginei keitiklio ašiai. Keitiklių matmenys ir elektrodų topologija turi sutapti. Aišku, toks keitiklio prototipo atitikmuo turi savo trūkumą. Jis nėra monolitinis ir turi ploną klijų sluoksnį, jungiantį dvi keitiklio dalis. Bet, esant plonam klijų sluoksniui, jų įtaką keitiklio savybėms turėtų būti minimali. Šis būdas nors ir turi trūkumų, visgi yra priimtiniausias.

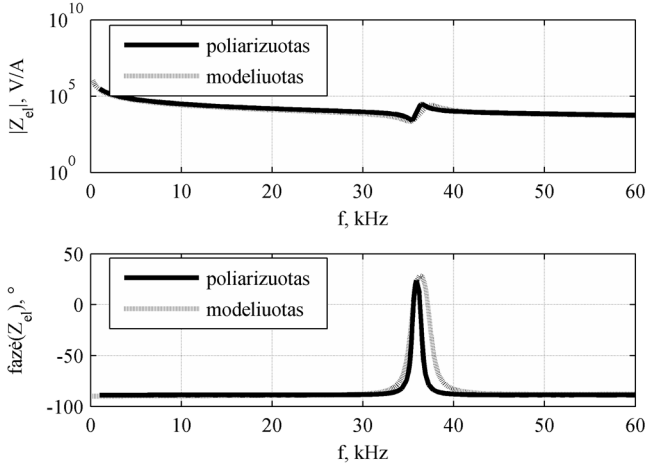
Pateikiami matavimų rezultatai bus įvardijami taip: „klijuotas“ keitiklis – gamyklinės poliarizacijos, klijuotas pjezokeitiklis; „poliarizuotas“ keitiklis – monolitinis keitiklis poliarizuotas laboratorijos sąlygomis; „modeliuotas“ keitiklis – skaitinis keitiklio modelis. Naudojamos 2 pagrindinės žadinimo schemos: išilginiams rezonansams rasti žadinami visi žadinimo elektrodai, o įžeminimo elektrodai įžeminami; lenkimo rezonansams – žadinami elektrodai a1, a4 ir a1’, a4’, o visi likę įžeminami.

3.5 paveiksle matomos tariamosios varžos dažninės charakteristikos klijuotam ir poliarizuotam keitikliams.



3.5 pav. Tariamosios varžos dažninės charakteristikos, žadinant pirmos išilginės formos svyravimus, klijuotam ir poliarizuotam keitikliams

Fig. 3.5. Frequency characteristics of impedance for the glued and the polarized actuators, while the first longitudinal mode of oscillations has been excited



3.6 pav. Tariamosios varžos dažninės charakteristikos, žadinant pirmos išilginės formos svyravimus, poliarizuotam ir modeliuotam keitikliams

Fig. 3.6. Frequency characteristics of impedance for the polarized and the modelled actuators, while the first longitudinal mode of oscillations has been excited

Klijuoto keitiklio išilginis rezonanso dažnis 35,12 kHz, antirezonanso – 36,66 kHz; poliarizuoto – 35,52 kHz ir 36,30 kHz atitinkamai. Jei palygintume abiejų prototipų tariamosios varžos modulio |Z| ir fazės θ kitimą, pastebėtume, kad už rezonanso zonos kitimas yra tapatus ir tiktai rezonanso atveju klijuoto keitiklio pamatuotos minimali ir maksimali vertės kinta stipriau (3.1 lentelė).

Poliarizuoto keitiklio ir skaitinio modelio tariamosios varžos priklausomybė nuo keitiklio žadinimo dažnio pateikiama 3.6 paveiksle.

Tariamosios varžos dažninės charakteristikos, pateiktos 3.5 ir 3.6 paveiksluose, parodo rezonansų dėsningumus. Rezonansai išilginių virpesių atvejų koncentruojasi ties 34 kHz dažniu. Sklaida yra nedidelė ir nesiekia 0,5 kHz. Fazių postūmis rezonanso metu tarp įtampos ir srovės yra lygus 0°. Tai parodo, kad šiame dažnių ruože vyksta pjezokeitiklio rezonansiniai svyravimai.

3.1 lentelė. Keitiklių pirmojo išilginio rezonanso pagrindinės charakteristikos
Table 3.1. Main characteristics of first longitudinal resonance of actuator

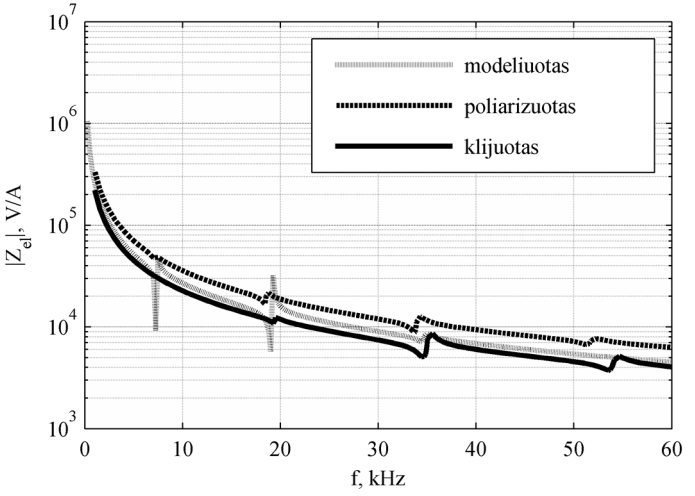
Keitiklis	f_r , kHz	f_a, kHz	$Z(f_m)$, V/A	f_m, kHz	$Z(f_n)$, V/A	f_n, kHz
klijuotas	35,12	36,66	1321	35,08	52270	36,72
poliarizuotas	35,52	36,30	2767	35,36	29810	36,49
modeliuotas	35,5	37,12	2174	35,25	26350	37,5

Sužadinus keitikliuose lenkimo virpesius, gaunamos impedanso priklausomybės nuo žadinimo dažnio (3.7 pav.).

Pateiktame pavyzdyje matome, kad impedanso modulio kitimo ekstremumų vietos lenkimo rezonansų atveju sutampa ir stebimi tik nežymūs skirtumai. Skaitinio modeliavimo metu gautas tariamosios varžos modulis lenkimo virpesių atveju turi žymiai didesnę amplitudę nei eksperimentinių modelių atveju. Išsamūs tariamosios varžos matavimų rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Keitiklių modelių rezonansiniai dažniai
Table 3.2. Resonances of actuator models

Moda	Rezonansinis dažnis f_r, kHz		
	modeliuotas	klijuotas	poliarizuotas
I lenkimo	7,25	7,0	-
II lenkimo	19,0	19,27	18,41
III lenkimo	34,5	34,41	33,68
I išilginė	35,5	35,12	35,52
IV lenkimo	-	53,5	51,19



3.7 pav. Impedanso dažninės charakteristikos žadinant trečios lenkimo formos svyravimus tiriamuose keitikliuose
Fig. 3.7. Frequency characteristics of impedance for the examined actuators, while the third flexural mode of oscillations has been excited

Jei palyginsime 3.2 lentelėje pateiktus duomenis, pastebėsime, kad keitiklio prototipo rezonansiniai dažniai yra daugiau pasislinkę žemųjų dažnių kryptimi, bet bendrai skaitinio modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo metu gauti duomenys yra panašūs ir didžiausias skirtumas tarp rezultatų neviršija 3%.

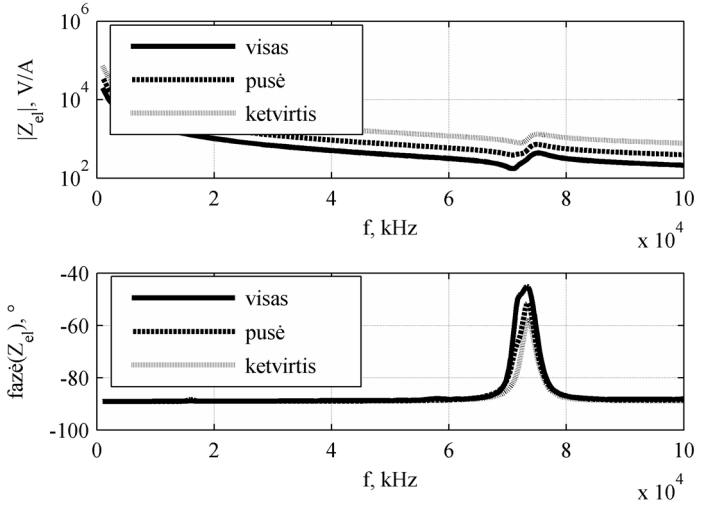
Apžvelgiant gautus rezultatus, galime pastebėti, kad tikslūs tariamosios varžos matavimai atskleidė poliarizacijos dėsningumus. Tai reiškia, kad nors ir keitikliai geometriškai yra simetriniai, esant skirtingiems kontaktams tarp skirtingos poliarizacijos zonų, klijuoto, modeliuoto ir poliarizuoto keitiklių savieji dažniai tolsta vienas nuo kito, o aktyvioji varža didėja.

Remiantis pateiktais rezultatais galima teigti, kad eksperimentinis modelis gali būti tapatinamas su skaitiniu modeliu. Nors ir gauti nežymūs skirtumai, tačiau jie neturėtų iš esmės keisti galutinio rezultato.

3.2.2. Cilindrinio pjezokeitiklio dažninė impedanso charakteristika

Analogiškai kaip ir ankstesniame poskyryje atliekami radialinės poliarizacijos keitiklio impedanso matavimai. Naudojamos atitinkamos žadinimo schemos: visas – žadinami visi išoriniai elektrodai; pusė – t1,t2,c3,c4 ir b1,b2 elektrodai; ketvirtis – t1,c3 ir b1 elektrodai. Centrinis ir visi likę elektrodai įžeminami.

Keitiklio prototipo tariamosios varžos priklausomybė nuo dažnio pateikiama 3.8 paveiksle. Kadangi keitiklio matmenys yra žymiai mažesni nei ankstesniojo keitiklio, rezonansiniai dažniai pasislinkę link aukštesnių dažnių.

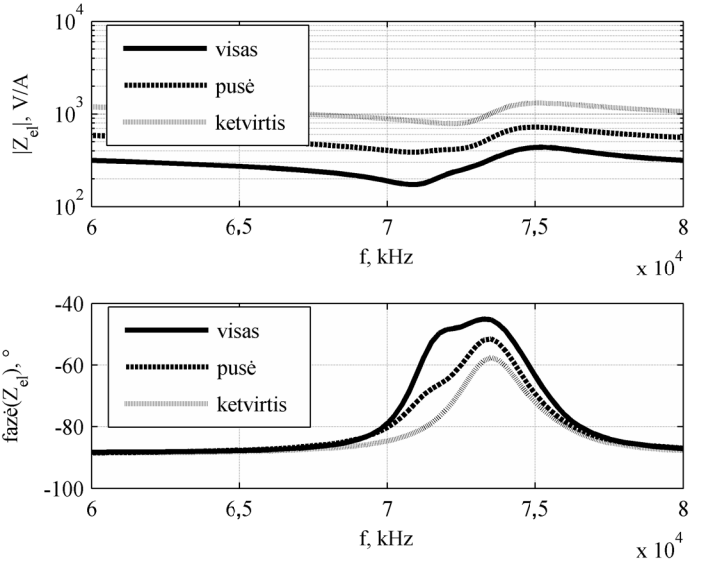


3.8 pav. Cilindrinio keitiklio impedanso charakteristika įvairioms žadinimo schemoms
Fig. 3.8. Frequency characteristics of impedance of the cylindrical actuator for different schemes of oscillation

Keitiklis yra visiškai simetrinis, todėl, renkantis skirtingas žadinimo schemas, virpesių energija yra tiesiog proporcinga žadinamam keitiklio plotui, o kadangi išilginių virpesių žadinimui reikia žadinti visą keitiklio plotą, o lenkimo virpesių žadinimo atveju – ne, tariamosios varžos modulio vertė auga proporcingai. Tai pastebima visame dažnių intervale. Skirtingiems žadinimo dažniams rezonansiniai dažniai pasiskirsto nuo 71 iki 72,25 kHz. Tai ryškiai matoma 3.9 paveiksle, kuriame pateikiamas padidintas rezonanso-antirezonanso ruožas. Čia akivaizdžiai matomi du rezonansiniai impedanso minimumai: pirmoji išilginių virpesių forma – 71 kHz ir trečioji skersinių virpesių forma – 72,25 kHz. Žadinant visą išorinį keitiklio elektrodų plotą, ryškiai matomas išilginių virpesių rezonansas, o žadinant tiktai "ketvirtį – lenkimo virpesių rezonansas. Kai žadinama "pusė" elektrodų topologijos, stebimi abu rezonansai.

Pagrindiniai pamatuoti dydžiai pateikiami 3.3 lentelėje. Pateiktose dažninėse charakteristikose 3.8 ir 3.9 paveiksluose matome, kad rezonansai lenkimo ir išilginių virpesių atveju koncentruojasi ties 71 kHz dažniu. Sklaida yra nedidelė, tik 1,25 kHz. Fazių postūmis tarp įtampos ir srovės siekia 60°. Tai

yra pakankamas požymis, kad šiame dažnių ruože vyksta didelės amplitudės svyravimai.



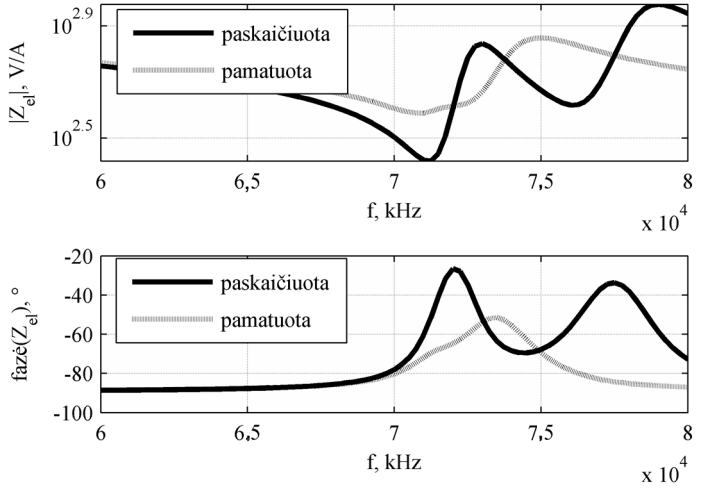
3.9 pav. Cilindrinio keitiklio tariamosios varžos charakteristikų palyginimas
Fig. 3.9. Comparison of frequency characteristics of actuator impedance

3.3 lentelė. Cilindrinio keitiklio prototipo ir skaitinio modelio tariamosios varžos charakteristikos
Table 3.3. Impedance characteristics of cylindrical prototype and numerical model of actuator

Keitiklis	Žadinimas	Moda	$Z(f_m)$, V/A	f_m, kHz	$Z(f_n)$, V/A	f_n, kHz
Eksperimentinis prototipas	visas	I išilginė	173	71,00	437	75,25
	pusė	I išilginė	388	71,00	721	75,25
	pusė	III lenkimo	415	72,25	648	74,25
	ketvirtis	III lenkimo	788	72,25	1310	75,25
Skaitinis modelis	pusė	I išilginė	264	71,00	687	73,00
	pusė	III lenkimo	414	76,00	942	78,75

Eksperimentiškai pamatuotos tariamosios varžos priklausomybės nuo žadinimo dažnio palyginimas su rezultatais, gautais atlikus skaitinį cilindrinio

keitiklio tyrimą, pateikiamas 3.10 paveiksle. Skaitinės dažnių ir impedanso vertės pateikiamos 3.3 lentelėje.



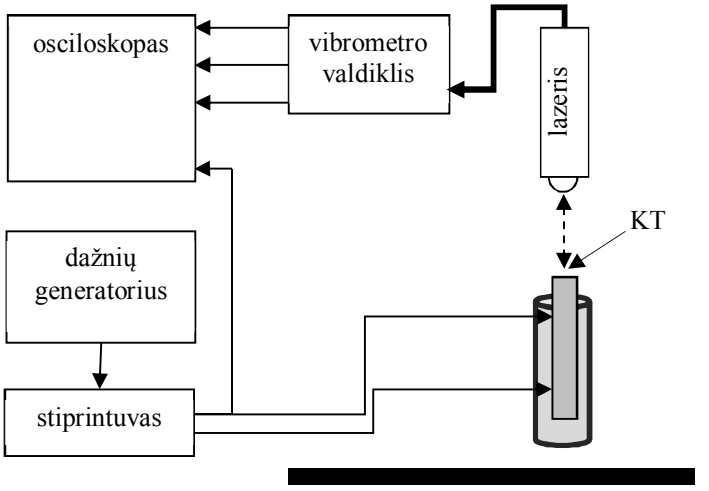
3.10 pav. Cilindrinio keitiklio prototipo ir skaitinio modelio impedanso charakteristikos mišriai žadinimo schemai palyginimas
Fig. 3.10. Comparison of impedance frequency characteristics of cylindrical actuator prototype and numerical model

Iš pateiktų rezultatų matome, kad išilginių virpesių rezonansai sutampa, o trečios lenkimo modos rezonanso atveju, pamatuoto ir suskaičiuoto impedanso minimumai yra pasislinkę. Skaitinio modelio atveju impedanso minimumas yra pasislinkęs per 3,75 kHz aukštesnių dažnių kryptimi, kas sudaro 5% paklaidą pamatuoto atžvilgiu.

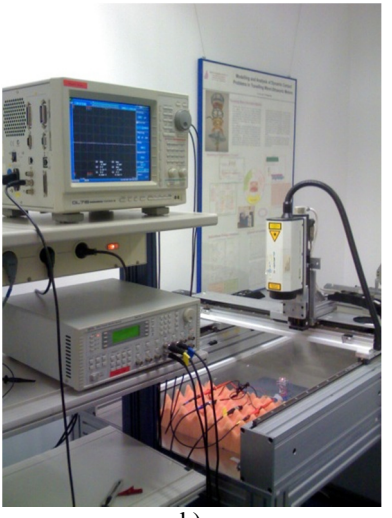
3.3. Eksperimentinis stendas

Atliekant eksperimentą, buvo naudojamas laboratorinių įrenginių kompleksas. Eksperimento metu naudojamo stendo principinė schema pateikta 3.11 paveiksle. Ant laboratorinio stalo, dedamas keitiklio laikiklis su pjezoelektriniu keitikliu, kuris įtvirtinimas trečiosios skersinių virpesių formos mazginiuose taškuose, suveržiant 8-niais varžtais su priklijuotomis viršūnėse porolono pagalvėlėmis (3.11c pav.). Tokiu būdu darome prielaidą, kad minkštas, bet neklampus porolono sluoksnis neįtakos keitiklio savųjų svyravimų ir tokiu būdu

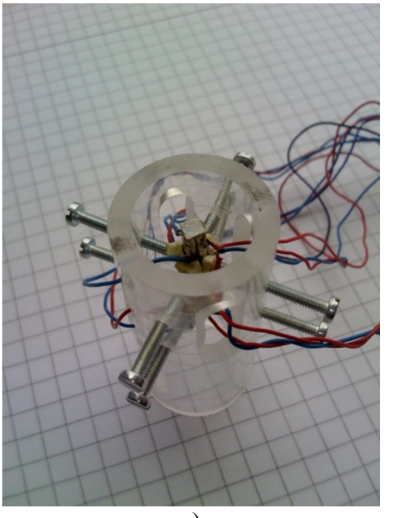
galime teigti, kad matuojamas rezultatas bus artimas neįtvirtinto keitiklio atvejui.



a)



b)



c)

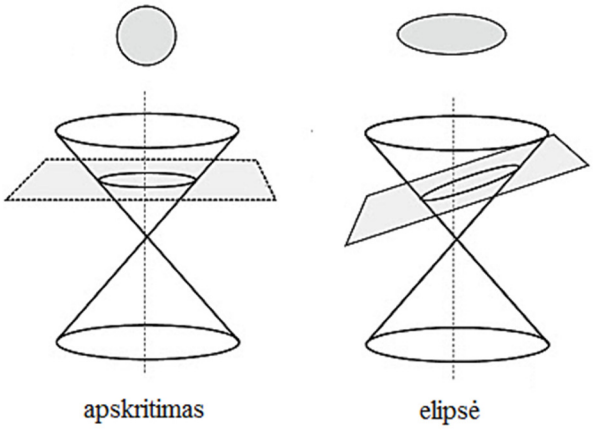
3.11 pav. Eksperimentinis stendas: a) principinė schema, b) stendo nuotrauka ir c) keitiklis įtvirtintas laikiklyje

Fig. 3.11. Experimental stand: a) principal scheme, b) a photo of the stand and c) the actuator clamped in holder

Harmoninis įtampos signalas yra generuojamas keturių kanalų generatoriuje (Wavetek 195). Stiprintuvuose (EMI 1040L) sustiprintas signalas prijungiamas prie atitinkamų keitiklio elektrodų priklausomai nuo konkrečios elektrodų žadinimo schemos. Taip pat stiprintuvo signalas pateikiamas į oscilografą (Yokogawa DL716). Pastarasis įvadas bus reikalingas žadinimo signalo įtampos kontrolei ir fazės poslinkiams tarp žadinamo ir pamatuoto virpesių signalo apskaičiuoti. Keitiklio kontaktinio taško virpesiai matuojami lazeriniu interferometru (Polytec CLV-3D). Gautas ir apdorotas signalas perduodamas vibrometro valdikliui (Polytec CLV-3000), kuris perkoduoja signalą virpesių greičių amplitudėmis v_x , v_y ir v_z ir gautas signalas yra pateikiamas į oscilografą. Oscilografo nuskaityti duomenys įrašomi ir išsaugojami tolesniam apdorojimui.

3.4. Keitiklio kontaktinio taško trajektorijų matavimai

Matavimų rezultatai gauti lazeriniu vibrometru pavyzdžiuose pateikiami neredaguoti. Pateikiama 10000 pamatuotų taškų 20-ties periodų metu. Elipsių parametrai apskaičiuojami gautuose taškuose aproksimuojant elipsę. Naudojamas mažiausio kvadratinio nuokrypio metodas, Bukšteino algoritmas.



3.12 pav. Kūgio ir plokštumos pjūviai
Fig. 3.12. Intersections of the cone with a plane

Šiuo atveju aproksimacijai naudojamas atvejis, kai elipsė (atskiruoju atveju – apskritimas) išreiškiama, kaip kūgio pjūvis plokštuma (3.12 pav.).

Sprendžiamas sekantis antros eilės polinomas:

$$\boldsymbol{F(a,x)} = \boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{x} = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0. \qquad (3.1)$$

Tai yra kūgio parametrinė lygtis, kur $\boldsymbol{a} = [a\ b\ c\ d\ e\ f]^T$, o $\boldsymbol{x} = [x^2\ xy\ y^2\ x\ y]^T$. Funkcija $\boldsymbol{F(a,x)}$ tai algebrinis atstumas nuo taško (x, y) iki kūgio $\boldsymbol{F(a,x)} = 0$. Kūgio derinimas gali būti pasiekiamas minimizuojant algebrinio atstumo kvadratą nuo kreivės iki *N* taškų.

$$\boldsymbol{D_A(a)} = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{F(x_i)^2}. \qquad (3.2)$$

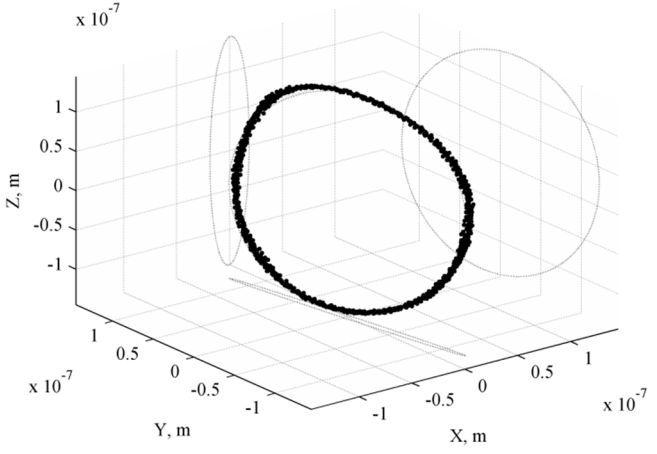
Bukšteinas yra pasiūlęs sekantį sprendinį (Bookstein, 1979). Jei parametrams yra nustatytas kvadratinis apribojimas, minimizacijos uždavinys gali būti sprendžiamas atsižvelgiant į apibendrintą savo reikšmių sistemą:

$$\boldsymbol{D^T D a} = \boldsymbol{\lambda C a}\ , \qquad (3.3)$$

čia $\boldsymbol{D} = [\boldsymbol{x}_1\ \boldsymbol{x}_2\ \cdots \boldsymbol{x}_n]^T$ yra vadinama projektavimo matrica, o $\boldsymbol{C}$ – ryšių matrica. Bendruoju atveju Bukšteino algoritmui galioja toks Lagranžo daugiklių ryšys:

$$\boldsymbol{\lambda_i^2 + \lambda_{i+1}^2 = 1}. \qquad (3.4)$$

Kadangi, šis metodas bus taikomas 10000 taškų tolygiai pasiskirsčiusių palei tariamą elipsinę trajektoriją, buvo daroma prielaida, kad paskaičiuoti aproksimuotos elipsės parametrai tiksliai apibūdins matuojamą trajektoriją.



3.13 pav. Pamatuotų taškų trajektorija, aproksimuota elipsėje ir jos projekcijos
Fig. 3.13. Measured points trajectory, an approximated ellipse and its projections

Pats metodas buvo realizuojamas MatLab aplinkoje (3.13 pav.) naudojant ortogonalią – trikampę dekompoziciją [Q,R] = qr(A), įverčių matricos

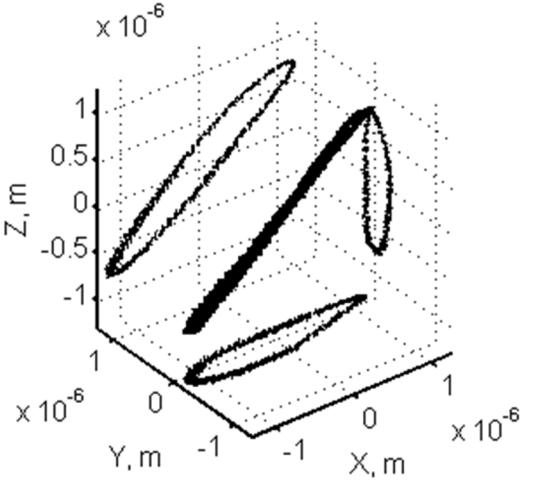
dekompoziciją [U,S,V] = svd(X) ir tikrinių verčių paieškos funkciją [V,D] = eig(A) (MatLab, 2009).

Kaip matome pateiktame pavyzdyje neidealios formos pamatuotų taškų trajektorija ir jai aproksimuota elipsė sutampa, matomos tiktai aproksimuotos elipsės projekcijos. Toliau darbe bus pateikiamos pamatuotos trajektorijos ir jų projekcijos, o lentelėse pateikiamos aproksimuotos elipsės parametrai.

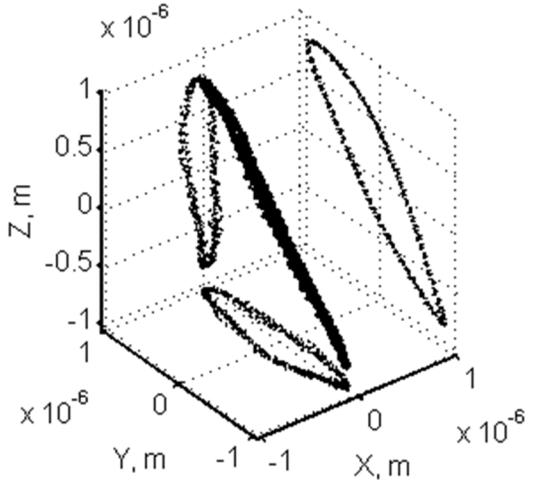
3.4.1. Dviejų poliarizacijos krypčių pjezokeitiklio kontaktinio taško trajektorijos

Matavimų metu keitiklis buvo žadinamas tomis pačiomis schemomis ir amplitudėmis kaip ir skaitinio modeliavimo atveju. Lazerinio vibrometro pagalba buvo matuojamos greičių dedamosios v_x , v_y ir v_z, kurių reikšmės buvo koduojamos kontrolerio išėjimo įtampos amplitude. Matavimo metu buvo naudojama 125 mm/s/V raiška. Iš gautų duomenų ir buvo apskaičiuojamos kiekvieno trajektorijos taško koordinatės. Toliau pateikiamuose pavyzdžiuose pateikiama po 1000 pamatuotų trajektorijos taškų.

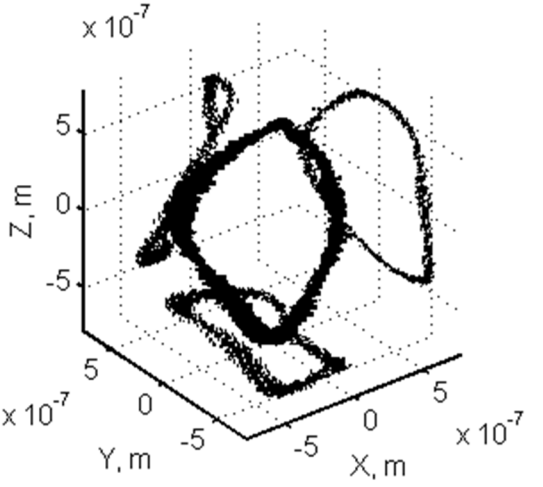
Žadinant pjezoelektrinį keitiklį 2.1 skyriuje pateiktomis schemomis Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 trečio lenkimo rezonanso gaunamos trajektorijos pateikiamos atitinkamai 3.14, 3.15 ir 3.16 paveiksluose, o trajektorijų parametrai 3.4 lentelėje.



3.14 pav. Pjezoelektrinio keitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis pamatuota kontaktinio taško trajektorija žadinant schema Nr. 1 (34,2 kHz)
Fig. 3.14. Measured trajectory of the contact point of bipolarized piezoelectric transducer measured by exciting with the excitation scheme No. 1 (34.2 kHz)



3.15 pav. Pjezokeitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis pamatuota kontaktinio taško trajektorija žadinant schema Nr. 2 (34,2 kHz)
Fig. 3.15. Measured trajectory of the contact point of bipolarized piezoelectric transducer measured by exciting excitation scheme No. 2 (34.2 kHz)



3.16 pav. Pjezokeitiklio su dvejomis poliarizacijos vektoriaus kryptimis pamatuota kontaktinio taško trajektorija žadinant schema Nr. 3 (34,2 kHz)
Fig. 3.16. Measured trajectory of the contact point of bipolarized piezoelectric transducer measured by exciting excitation scheme No. 3(34.2 kHz)

3.4 lentelė. Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatyti elipsės parametrai
Table 3.4. Numerically and experimentally obtained parameters of the ellipses

Parametrai	Skaitiniai rezultatai			Eksperimentiniai rezultatai		
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Didysis elipsės pusašis, μm	2,3	2,2	2,7	1,4	1,2	0,5
Mažasis elipsės pusašis, μm	0,4	0,4	1,4	0,27	0,33	0,4
Posvyrio kampas xy plokštumoje	4°	85°	61°	6°	88°	67°
Posvyrio kampas xz plokštumoje	34°	72°	34°	30°	84°	61°
Posvyrio kampas yz plokštumoje	98°	146°	139°	83°	127°	107°

Nors svyravimų amplitudės nėra labai didelės ir nesiekia 1 μm, bet jų parametrai yra tikslūs. Kiekviena elipsinė trajektorija yra palinkusi apie 45° varymo kryptimi. Visi trajektorijos taškai sąlyginai yra vienoje plokštumoje.

3.16 paveiksle pateikta elipsinė trajektorija nėra labai stabili. Nors elipsės amplitudės yra labai mažos (tik 5×10^{-7} m), eksperimentiniai rezultatai patvirtina skaitinius rezultatus. Esamas amplitudes galima suintensyvinti žadinant keitiklį aukštesne įtampa arba žadinant didesnį elektrodų plotą.

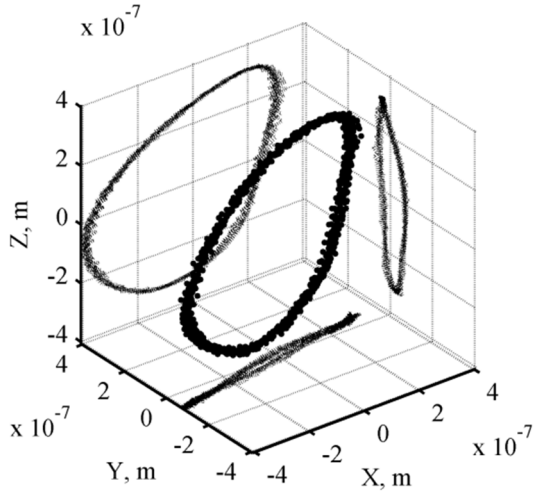
Matavimai parodė, kad lenkimo savųjų formų dažniai abiem kryptimis yra arti vienas kito ir rezonanso metu daro didelę įtaką vienas kitam. Bet pasirinkus aukštesnį dažnį generuojamo lenkimo amplitudė tampa žymiai didesnė nei simetrinė. Tai leidžia išvengti nepageidaujamų virpesių statmena kryptimi žadinamajai. Iš rezultatų matyti, kad pagrindinė žadinamų svyravimų amplitudė yra žymiai didesnė nei jai simetrinė.

Palyginus eksperimentinius rezultatus su skaitiniais, galima teigti, kad eksperimento metu pasisekė gauti geresnius rezultatus nei rodė skaičiavimai.

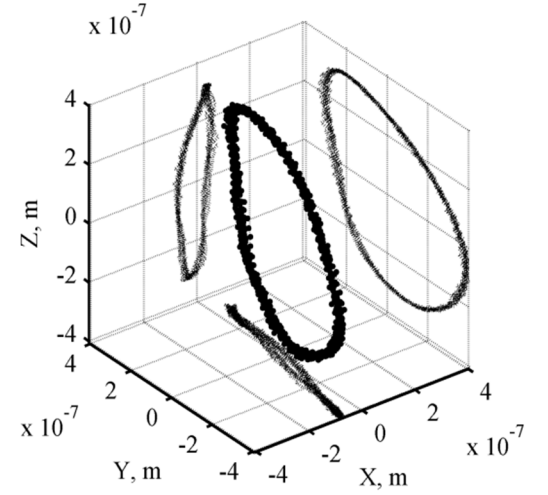
3.4.2. Cilindrinio pjezokeitiklio kontaktinio taško trajektorijos

Cilindrinio pjezokeitiklio kontaktinio taško trajektorijos buvo matuojamos taikant skaitinio modeliavimo atveju naudotas žadinamo schemas ir amplitudes. Matavimo lazeriniu vibrometru metu buvo naudojama 125 mm/s/V raiška. Iš gautų duomenų apskaičiuotos trajektorijos pateikiamos pavyzdžiuose. Pateikiama po 1000 pamatuotų trajektorijos taškų.

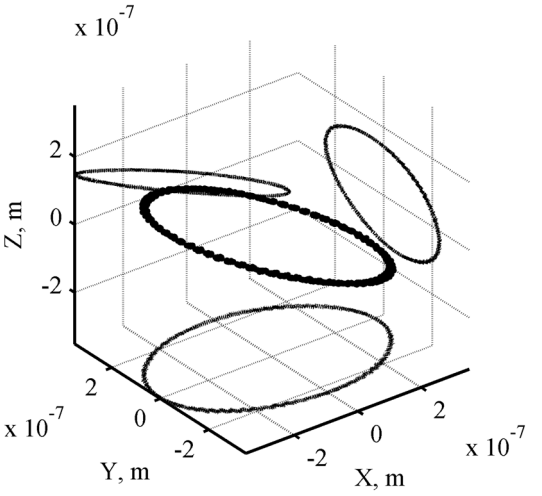
Žadinant pjezoelektrinį keitiklį žadinimo schemomis Nr. 1, Nr. 2 ir Nr. 3 trečio lenkimo rezonanso atveju gaunamos trajektorijos pateikiamos 3.17, 3.18 ir 3.19 paveiksluose. Pjezokeitiklio simetrija lėmė, kad pamatuotos trajektorijos virpesiams plokštumose x0z ir y0z yra simetrinės. Kaip matome, simetrinių virpesių dedamosios yra nežymios ir elipsinės trajektorijos išsidėsčiusios plokštumose sutampančiose su planuojamo poslinkio krypties ašimis.



3.17 pav. Radialinės poliarizacijos keitiklio pamatuota kontaktinio taško trajektorija žadinant schema Nr. 1 (71 kHz)
Fig. 3.17. The measured trajectory of the contact point of actuator with radial polarization under excitation scheme No. 1 at 71 kHz



3.18 pav. Radialinės poliarizacijos keitiklio pamatuota kontaktinio taško trajektorija žadinant schema Nr. 2 (71 kHz)
Fig. 3.18. The measured trajectory of the contact point of actuator with radial polarization under excitation scheme No. 2 at 71 kHz



3.19 pav. Radialinės poliarizacijos keitiklio pamatuota kontaktinio taško trajektorija žadinant schema Nr. 3 (71 kHz)
Fig. 3.19. The measured trajectory of the contact point of actuator with radial polarization under excitation scheme No. 3 at 71 kHz

Didžiojo ir mažojo pusašių santykis yra artimas 2:1, o elipsinės trajektorijos posvyrio kampas pagrindinėje plokštumoje artimas 60°.

Pamatuota trajektorija, skirta sukamajam judesiui formuoti pateikiama 3.19 paveiksle. Šios elipsinės trajektorijos pusašių santykis (1:1) ir trajektorijos plokštumos posvyris į *x0z* plokštumą (-32°) leidžia teigti, kad ji yra tinkama sukamajam rotoriaus judesiui formuoti.

3.5 lentelė. Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatyti elipsės parametrai
Table 3.5. Numerically and experimentally obtained parameter of the ellipses

Parametrai	Skaitiniai rezultatai			Eksperimentiniai rezultatai		
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 1	Nr. 2
Didysis elipsės pusašis, μm	0,518	0,517	0,511	0,395	0,397	0,392
Mažasis elipsės pusašis, μm	0,262	0,263	0,509	0,256	0,255	0,354
Posvyrio kampas xy plokštumoje	0°	90°	176°	-6°	10°	168°
Posvyrio kampas xz plokštumoje	58°	90°	125°	28°	28°	158°
Posvyrio kampas yz plokštumoje	90°	56°	103°	83°	78°	86°

3.5 lentelėje pateikiamas pjezoelektrinio keitiklio kontaktinio taško elipsinės trajektorijos parametrų palyginimas.

Iš pateiktų pavyzdžių matome, kad pamatuotos ir apskaičiuotos kontaktinio taško elipsinės trajektorijos yra artimose plokštumose. Parametrų skirtumai nežymūs. Tai reiškia, kad eksperimentas patvirtino skaitinio modeliavimo rezultatus. Palyginus modeliavimo ir matavimo duomenis matome, kad eksperimentinio keitiklio kontaktinio taško elipsinės trajektorijos mažojo pusašio yra mažesnės, bet elipsės posvyrio kampas didesnis.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

Eksperimentinio tyrimo metu buvo ištirti du pjezoelektriniai keitikliai su įvairiakrypčiais poliarizavimo vektoriais. Pagrindinis eksperimento tikslas buvo patvirtinti skaitinių tyrimų rezultatus.

1. Eksperimento metu buvo nustatyta, kad įmanoma poliarizuoti kvadratinio skerspjūvio pjezoelektrinį strypą taip, kad žadinant vieną pjezokeitiklio pusę elektriniu signalu, šioje dalyje veikiantis elektrinis laukas neįtakotų antros keitiklio pusės. Šiam tikslui keitiklio centre tarp dviejų poliarizuojamų keitiklio dalių buvo palikta nepoliarizuojama 4 mm pločio buferinė zona.

2. Eksperimentinių tyrimų metu atlikti pjezoelektrinių keitiklių kontaktinio taško virpesių trajektorijos matavimai patvirtino, kad dviejų poliarizacijos vektoriaus krypčių ir radialinės poliarizacijos pjezoelektriniai keitikliai priklausomai nuo elektrodų žadinimo schemos gali kurti elipsines trajektorijas pasirinktose plokštumose.

Žadinant dviejų poliarizacijos vektoriaus krypčių pjezokeitiklį 34,2 kHz dažniu buvo generuojama kontaktinio taško trajektorija, kurios plokštumą:

- nukrypusi nuo *xOz* plokštumos 6°, kai žadinami *xOz* virpesiai;
- nukrypusi nuo *yOz* plokštumos 6°, kai žadinami *yOz* virpesiai;
- nukrypusi nuo *xOy* plokštumos 61°, kai žadinami *xOy* virpesiai.

Žadinant radialinės poliarizacijos pjezokeitiklį 71 kHz dažniu buvo generuojama kontaktinio taško trajektorija, kurios plokštumą:

- nukrypusi nuo *xOz* plokštumos 6°, kai žadinami *xOz* virpesiai;
- nukrypusi nuo *yOz* plokštumos 10°, kai žadinami *yOz* virpesiai;
- nukrypusi nuo *xOy* plokštumos 32°, kai žadinami *xOy* virpesiai.

3. Skaitinių ir eksperimentinių tyrimų metu gauti pjezokeitiklių rezonansiniai dažniai skiriasi nežymiai. Dviejų poliarizacijos vektoriaus krypčių keitiklio skaitiškai apskaičiuotas išilginių virpesių rezonanso dažnis – 35,5 kHz nuo eksperimentiškai išmatuoto – 35,52 kHz skiriasi tik 0,05%. Radialinės poliarizacijos keitiklio atveju skaitiškai apskaičiuotas išilginių virpesių

rezonanso dažnis – 71 kHz sutapo su eksperimentiškai išmatuotu – 71 kHz. Tai parodo, kad sudaryti pjezoelektrinių keitiklių skaitiniai modeliai gali būti naudojami tiriant pjezokeitiklių virpesius.

Bendrosios išvados

1. Atlikus pjezoelektrinių keitiklių tyrimų mokslinių darbų analizę, nustatyta, kad trijų laisvės laipsnių slankiklio judesiui formuoti šiuo metu naudojami keli vieno laisvės laipsnio pjezokeitikliai arba keitikliai, turintys sudėtingas virpesių žadinimo schemas. Tokių pjezomechaninių konstrukcijų tikslumas yra sudėtingai valdomas, todėl kyla poreikis sukurti naujus daugelio laisvės laipsnių pjezoelektrinius keitiklius.

2. Pasiūlyti du inovatyvūs įvairiakryptės poliarizacijos strypinių pjezoelektrinių keitiklių konstrukciniai variantai. Atlikus šių keitiklių skaitinius ir eksperimentinius tyrimus buvo parodyta, kad žadinant šiuos keitiklius pagal suderintą elektrodų pajungimo schemą harmoniniu elektriniu signalu, galima suformuoti kontaktinio taško daugiakomponentes virpesių formas.

3. Nustatyti dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezoelektrinių keitiklių geometrinių matmenų santykiai, prie kurių išilginių ir skersinių virpesių tikriniai dažniai sutampa. Dviejų poliarizacijos krypčių kvadratinio skerspjūvio pjezoelektrinio keitiklio matmenys yra: plotis ir aukštis – 4 mm, ilgis – 39,6 mm, t. y. pločio ir ilgio santykis lygus 9,9. Radialinės poliarizacijos keitiklio matmenys yra: skersmuo – 3,2 mm ir ilgis – 27,3 mm, o skersmens ir ilgo santykis lygus 8,5. Tai sudaro sąlygas sukurti

universalią elektrodų topologiją, kuri leidžia keisti svyravimų plokštumą, keičiant fazės skirtumą tarp žadinimo signalų.

4. Sukurtas dvikryptės ir radialinės poliarizacijos pjezoelektrinių keitiklių elektrodų konfigūracijos skaičiavimo algoritmas, kurio pagalba nustatytos elektrodų konfigūracijos išilginių ir/arba skersinių tikrinių virpesių generavimui, esant vienodam žadinimo signalo dažniui. Kiekvienam keitiklio modeliui nustatytos po tris unikalias žadinimo schemas, generuojančias kontaktinio taško elipsines trajektorijas trijuose skirtingose plokštumose.

5. Sudaryti pasiūlytų pjezoelektrinių keitiklių baigtinių elementų modeliai ir atlikti skaitiniai dinamikos tyrimai, kurių rezultatai panaudoti keitiklių žadinimo schemų nustatymui. Skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai patvirtino, kad nustatytos pjezokeitiklių elektrodų topologijos ir žadinimo schemos leidžia valdyti kontaktinio taško elipsinės trajektorijų plokštumos posūkio kampą ir elipsės posvyrio kampą.

6. Atlikta skaitinių ir eksperimentinių rezultatų lyginamoji analizė patvirtino, kad gauti teoriniai ir eksperimentiniai abiejų pjezoelektrinių keitiklių variantų tyrimo rezultatai yra lygiaverčiai. Bendruoju atveju rezultatų skirtumas tikriniams dažniams neviršijo 7% .

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.

Aoyagi, M.; Takano T.; Tamura, H.; Hirose, S. and Tomikawa, Y. 2008. Thin Ultrasonic Spindle-Motor Using Non-Axisymmetric ((1,1))-Mode of a Ring Vibrator. in *Proceedings of Actuator 08 Conference*, Bremen: 603–606

ANSYS Release 10.0. 2009. *Documentation for ANSYS*. SAS IP, Inc.

Bansevičius, R.; Giniotis, V. 2005. Mechatronic correctional devices for precision engineering, in *Solid State Phenomena: Proc. of The 9-th International Conference Mechatronic Systems and Materials 2005*, Vilnius, Lithuania, 429–434.

Bansevičius, R. 2008. Multi-degree-of-freedom ultrasonic motors for mass-consumer devices, *Journal of Electroceramics*. Dordrecht : Springer. 20(3–4): 221–224.

Bansevičius, R.; Telksnytė, S.; Janušas, G.; Palevičius, A. 2011. Hybrid numerical-experimental investigation of two-degree-of-freedom piezoelectric positioning actuator, *Mechanika.* Kaunas, 17(2): 182–186.

Barauskas, R.; Ostaševičius, V. 1998. *Analysis and Optimizatios of Elastic Vibroimpact Systems: Computational Methods and Applications*. Kaunas: Technologija, 213 p.

Bubulis, A. 2002. *Preciziniai vibraciniai įrenginiai skysčiams ir birioms medžiagoms duozoti*. Kaunas: Technologija, 160 p.

Bubulis, A.; Jūrėnas, V. 2008. *Pjezomechanika*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 142 p.

Bookstein, F. L. 1979. Fitting Conic Sections to Scattered Data. *Computer Graphics and Image Processing* 9(1): 56–71.

Blechertas, V. 2007. *Neharmoninių rezonansinių virpesiųpjezoelektrinių varikliųkūrimas ir tyrimas.* Daktaro disertacijos santrauka, Kaunas, 34 p.

CeramTec. [interaktyvus]. 2011. *Piezo-ceramic Manufacturing Process*. [žiūrėta: 2011 m. balandžio 20 d.] Prieiga per internetą <http://www.ceramtec.com/ceramic-materials/piezo-ceramics/manufactur ing-process>.

Claeyssen, F.; Ducamp, A.; Barillot, F.; Letty, R. Le; Porchez, T.; Sosnicki, O.; Belly, C.. 2008 Stepping Piezoelectric Actuators Based on APAs. *in Proceedings of Actuator 08 Conference*, Bremen: 623–626.

Dembele, S.; Rochdi, R. 2006. A three DOF linear ultrasonic motor for transport and micropositioning, Sensors and Actuators A 125: 486–493.

Diefenbach, G.; Morales, Serrano, F.; Reichinger, C. 1998. Miniaturised coupled-resonance piezomotor for an optical system, in proc. *Actuator 98,* 6th International Conference on New Actuators. Bremen: 318–321.

Doshida, Y.; Kishimoto, S.; Irieda, T.; Tamura, H.; Tomikawa, Y. and Hirose, S. 2008. Investigation of Double-Mode Miniature Cantilever-Type Ultrasonic Motor Using Pb-Free Array-Type Multilayer Piezoelectric Ceramics, in *Proceedings of Actuator 08 Conference*, Bremen: 592-595.

Engdahl, J. 1978. *Fastening and Suspension Element for a Piezoelectric Resonator*. USA Patent No. 4104553.

Hagedorn, P.; Wallaschek , J. 1992. Travelling wave ultrasonic motors, Part I: Working principle and mathematical modeling of the stator, *Journal of Sound and Vibration* 155(1): 31–46.

Hemsel, T.; Wallaschek, J. 2000. Piezoelectric linear motor, in proc. *Actuator 2000*, 7th International Conference on New Actuators. Bremen, 250–253.

Hemsel, T. 2001. *Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe*. Paderborn: Universitet Paderborn.

Higuchi, T.; Watanabe, M.; Kudou, K. 1988. Precise Positioner Utilising Rapid Deformation of Piezoelectric Element, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering* 54(11): 2107–2112.

Hermann, M. 1998. *Entwicklung und Untersuchung piezoelektrisch erregter Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen.*Stuttgart: Universität Stuttgart.

Higuchi, K. 1995. A piezoelectric linear motor driven by superposing standing waves with phase difference, in proc. of *Structural Dynamics & Materials Conference*, Seattle, WA, 3296–3303.

Hirata, H.; Ueha, S. 1993. Characteristics estimation of a travelling wave type ultrasonic motor, *Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control* 40(4): 402–406.

Hirata, H.; Ueha, S. 1995. Design of Traveling Wave Ultrasonic Motor. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control* 42(2): 225–231.

IMTL. 2005. *PZT Application Manual*. Cheongju: Inteligent Material & Technology Lab in Chungbuk National University.

Jordan, T.,L.; Ounaides, Z. 2001. *Piezoelectric Ceramics Characterization*. Hampton: NASA.

Jung, W-S.; Chong-Yun Kang, Ch-Y.; Vasilje, P.; Do Kim, J-D; Yoon, S-J. 2008. Control Method of Omni-Directional Piezoelectric Actuator System, in *Proceedings of Actuator 08 Conference*, Bremen: 550–553

Kawai, T. 1984. *Piezoelectric Vibration Wave Motor with Multiple Traveling Wave Generating Members*. USA patent No. 4484099.

Koch, J. 1988. *Piezoxide*. Hamburg: Heidelberg.

Kulvietis, G.; Tumasoniene, I.; Mazeika, D. 2006. The design of the multicomponent ultrasonic actuator on the basis of mode-frequency analysis, *WSEAS Transactions on Systems* 5(5): 924–929

Kuribayshi, M. 1985. Excitation conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor, *Journal of the Acoustical Socienty of America* 77(4): 1431-1435.

Kumada, A. 1985. A piezoelectric ultrasonic motor, *Japanese Journal of Applied Physics* 24(2): 739–741.

Kurosawa, M. 2000. State-of-the-art surface acoustic wave linear motor and its future applications, *Ultrasinics* 38(1-8): 15–19.

Kurosawa, M.; Higuchi, T. 1999. Surface acoustic wave linear motor, in *Mechatronics and Advanced Motion Control 49,* proc. *3rd International Heinz Nixdorf Symposium*, Paderborn, 113–118.

Kurosawa, M.; Ueha, S. 1991. Hybrid Transducer Type Ultrasonic Motor, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control* 38(2): 89–92.

Li, Z.; Zhao, Ch.; Huang, W.; Li, Z-L. 2007. Several key issues in developing of cylinder type 3-DOF ultrasonic motor, *Sensors and Actuators* A 136: 704–709.

Li, M.; Zhang, M.; Sun, L. 2008. A Novel Torsional Ultrasonic Motor Using Bulk PZT Elements in Proceedings of Actuator 08 Conference, Bremen, 636–639

Li, Ch.; Yao, H. 2008 A Novel Approach for Slender Shaped Piezoelectric Linear Motors. in *Proceedings of Actuator 08 Conference*, Bremen: 607–610

Lietuvos mokslas. 1998. *Virpesiu mechanika ir technika*. Vilnius: Lietuvos mokslas.

Mažeika, D. 1999. *Daugiamačių pjezokeitiklių geometrijos ir elektrodų konfigūracijos optimizavimas*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino Technokos Universitetas. Vilnius.

Morita, T.; Kurosawa, M.; Higuchi, T. 1998. A cylindrical micro ultrasonic motor using PZT thin film deposited by single process hydrothermal method (∅2.4 mm, L=10 mm Stator transducer), *IEEE Transactions on Ultrasonis Ferroelectrics and Frequency Control*: 1178–1187.

Morita, T.; Kurosawa, M.; Higuchi, T. 1999. A micro ultrasonic motor using bulk PZT for robot hands, *Japanese Journal of Applied Physics* 38: 3347–3350.

Morita, T.; Kurosawa, M.; Higuchi, T. 1999. A cylindrical shaped micro ultrasonic motor utilizing PZT thin film (1.4 mm in diameter and 5.0 mm long stator transducer), *Sensors and Actuators* 83: 225–230.

Ohnishi, O., et al. 1993. Piezoelectric Ultrasonic Motor Using Longitudinal – Torsional Composite Resonance Vibration, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 40(6): 687–693.

Ohnishi, Y.; Sugimoto, H.; Yano, M. 1990. Ultrasonic linear motor using torsional flexural traveling wave, in *Proceedings of the 2nd International Power Electronics Conference* 2, 894–900.

Ostaševičius, V. 1998 *Mechaninių konstrukcijų dinamika ir modeliavimas*. Kaunas: Technologija.

PICeramics. 2008. Piezo-University. PI Ceramics: Piezotechnology. [Tinkle] 2008 m. [Cituota: 2010 m. 09 12 d.] http://www.piceramic.com/download.php.

PICeramics. 2011. New Piezeolectric Materials & Components Catalog. PI Piezotechnology. [Tinkle] 2011 m. [Cituota: 2011 m. 10 07 d.] http://www.piceramic.com/download.php.

Ragulskis, K., at al. 1988. *Vibromotors for Precision Microrobots*. New York: Hemisphere Publishing. 325 p.

Sashida T. 1982. *Motor Device Using Supersonic Vibration*. Japan patent No. 58-148682.

Sashida, T.; Kenjo, T. 1993. *An Introduction to Ultrasonic Motors*. Oxford: Oxford Clarendon Press. 242p.

Schlüter, M. 2008. Sequentially Driven Elliptec Motors – A New Driving Concept for Performance Enhancement in Applications with Multiple Elliptec-Piezomotors, in *Proceedings of Actuator 08 Conference*, Bremen: 600–603

Schreiner, M.; Huber, W. 1999. *Wanderwellenmotor mit Temperatur-meßeinrichtung und Verfahren zur Temperaturmessung*. Deutschland patent No. 19742447.

Takemura, K.; Maeno, T. 2000. Characteristics of an ultrasonic motor capable of generating a multi-degrees of freedom motion, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000, pp. 3660–3665.

Takemura, K.; Park, Sh.; Maeno, T. 2008. Control of multi-DOF ultrasonic actuator for dexterous surgical instrument, *Journal of Sound and Vibration* 311: 652–666

Tamura, H.; Aoyagi, M.; Takano, T.; Tomikawa, Y. and Hirose, S. 2008. Single Phase Drive Ultrasonic Motor Using LiNbO3 Vibrator, in Proceedings of Actuator 08 Conference, Bremen: 596-599

Technohands Co. Ltd. 2010. Rotary model ultrasonic motor PUMR series. [interaktyvus, žiūrėta 2010-04-10]. Prieiga per internetą:<http://www.technohands.co.jp/en/products/um-pumr.html>

Tian, Y.; Shirinzadeh, B.; Zhang, D. 2010. Design and Dynamics of a 3-DOF flexure-based parallel mechanism for micro/nano manipulation, *Microelectronic Engineering* 87: 230–241.

Toda, K.; Tokumaru, H. 1993. Oscillation-Type Ultrasonic Linear Actuator, *Japanese Journal of Applied Physics* 33: 3071–3075.

Toyoda J., Murano K. 1991. A Small – Size Ultrasonic Linear Motor, *Japanese Journal of Applied Physic* 30(9S): 2274–2276.

Tokusima, A.; Inaba, R. 1985. *Piezoelectric Motor*. USA patent No. 4562373

Tumasonienė, I. 2009. Precizinių mikrorobotų pjezokeitiklių savųjų formų atpažinimo problema: daktaro disertacija. Vilnius: Technika.

Tumasoniene, I.; Kulvietis, G.; Mažeika, D.; Bansevicius, R. 2007. The Eigenvalue Problem and its Relevance to the Optimal Configuration of Electrodes for Ultrasound Actuators, *Journal of Sound and Vibration* 308(3-5): 683-691.

Tzou, H. S. 1993. *Piezoelectric Shells: Distributed sensing and control of continua*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers.

Uchino, K.; Kato, K.; Tohda, M. Ultrasonic linear motors using a multilayered piezoelectric actuator, *Ferroelectrics* 87: 331-334.

Ueha, S.; Tomikawa, Y. 1993. *Ultrasonic Motors Theory and Applications*. Oxford: Oxford Clarendon Press. 297 p.

Vasiljev, P.; Mažeika, D.; Kulvietis, G.; Vaičiulienė, S.. 2006. Piezoelectric Actuator Generating 3D-rotations of the Sphere, in *Solid State Phenomena* 13, *Conference of Mechatronic Systems and Materials 2006*, 173–178.

Vasiljev, P.; Yoon, S.; Vasiljeva, L. 2008 New Actuators Such as « a Shaking Beam » in the Piezomotors. in Proceedings of Actuator 08 Conference, Bremen: 631-635

Vishnevsky, V. S., et al. 1978. *Piezoelectric Motor Structures*. USA patent No. 4019073.

Wehrsdorfer, E., at al. 1998. Piezoelektrischer Mikrostoßantrieb, *F und M. Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik* 106 (4): 212–217.

Wischnewski, A.; U. Brueggemann, W. Wischnewskiy. 2008 New Ultrasonic Piezoelectric Actuator. in Proceedings of Actuator 08 Conference, Bremen: 615-619

Wischnewski, A.; Philips, B.; Wischnewskiy, W. 2008 RodDrive: Ultrasonic Piezo Drive. in *Proceedings of Actuator 08 Conference*, Bremen: 617–620.

Yabuki, A., at al. 1994. Piezoelectric linear motors for driving head element of CD-ROM, *Japanese Journal of Applied Physics* 33(9): 5365–5369.

Yamamoto H., et al. 1985. *Piezoelectrically driven vibration wave motor*. USA patent No. 4504760.

Zemella, R. 1990. *Desing and Development of a Linear Traveling Wave Motor*, M.S. thesis in aeronautics and astronautics, Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts.

Zhao, Ch. 2010. *Ultrasonic Motors: technologies and Application*. Beijing: Springer.

Zumeris J. 1995.*Ceramic Motor*. USA patent No. 5453653.

Zumeris J. 1997. *Ceramic Motor*. USA patent No. 5616980.

Mori K. 1984. *Piezoelectric Rotary Actuator*. USA patent No. 4468583.

Архангельский, М., Е. 1963. О превращении ультразвуковых колебаний поверхности во вращательное и поступательное движение тела, Акустика 9: 275–278.

Бансявичюс, Р. Ю., и др. 1978. Вибродвигатель вращательного движение. СССР Патент № 604058.

Бансявичюс, Р., и др. 1977. Опора прямолинейного перемещения. СССР Патент № 581336.

Бансявичюс, Р. Ю.; Курыло, Р. Э.; Рагульскис К.М. 1979 Исследование динамики взаимодействия объекта конечных размеров с продольной бегущей высокочастотной волной , *Научн. тр. Вузов ЛитССР* 4: 41–46.

Бансявичюс, Р. Ю.; Курыло, Р. Э.; Рагульскис, К. М. 1979. Исследование динамики материальной точки, транспортируемой продольной высокочастотной бегущей волной, *Научн. тр. Вузов ЛитССР* 4: 79–82.

Бансявичюс, Р. Ю.; Рагульскис, К. М. 1973. О преобразовании ультразвуковых колебаний в непрерывное движение, *Материалы VIII Всесоюзной акустической конференции*, 196-201.

Бансявичюс, Р. Ю.; Рагульскис, К. М. 1975. *Устройство для привода магнитного барабана*. СССР Патент № 475657.

Бансявичюс, Р. Ю.; Рагульскис К. М.; Улозас Р. К. 1978. О применении высокочастотных вибрационных преобразователей для протягивания бумажной ленты, *Научн. тр. Вузов ЛитССР* 2: 145–151.

Бансявичюс, Р. Ю.; Рагульскис К. М. 1981. *Вибродвигатели*. Вильнюс.

Васильев, П. Е.; Карманов, Л. Л. 1981. Расчет и исследование пакетного пьезокерамического преобразователя колебаний для вибродвигателя, *Электронная техника*, 54–56.

Вишневский, В. С.; Карташев, И. А.; Лавриненко, В. В. 1976. Исследование характеристик пьезоэлектрических двигателей с пассивным ротором, *Диэлектрики и полупроводники* 10: 38–41.

Ганнев, Р. Ф.; Украйнский, Р. Е. 1975. *Динамика частиц при воздействии вибраций*. Киев.

Гончарович, И.Ф. 1972. *Динамика вибрационного транспортирования*. Москва.

Джагупов, Р. Г.; Ерофеев, А., А. 1986. *Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике*. Ленинград.

Зарембо, Л. К. 1968. Акустическое течение, *Физика и техника мощного ультразвука. Мощные ульразвуковые пол,* 134–146.

Лавриненко, В. В.; Карташев, И. А.; Вишневский В.С. 1980. *Пьезоэлектрические двигатели*. Москва

Маркаускайте, Г. К.; Паташене, Л. Р. 1981. Кинематика волновых процесов в кольцах, *Межвузовский тематический сборник научных трудов* 1: 133–136.

Панов, А. П.; Приходько. 1976. К выбору ультразвуковой колебательной системы для очистки деталей, *Тезисы докладов Всесоюзного научно – технического симпозиума*, Одесса, 99–103.

Паташене, Г. К.; Рагульскис К. М. 1979. Возбуждение волновых деформации в круговом кольце, *Межвузовский тематический сборник научных трудов* 1: 150-153.

Рагульскене, В. Л. 1974. *Виброударные системы (теория и применение)*. Вильнюс.

Рагульскис, К. М.; Бансявичюс, Р. Ю. 1973. О преобразовании высокочастотных механических колебаний в непрерывное движение, *Научн. тр. Вузов ЛитССР* 3, 9–1

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vasiljev, P.; Borodinas, S.; Bareikis, R.; Luchinskis, R. [Lučinskis, R.] 2008. The square bar-shaped multi-DOF ultrasonic motor, *Journal of Electroceramics* 20(3–4), 231–235, ISSN 1385-3449 (ISI Web of Science).

Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Hemsel, T.; Bansevičius, R. 2010. The experimental research of piezoelectric actuator with two vectors of polarization direction, *Mechanika* 2(82). Kaunas: Technologija, 50–57. ISSN 1392-1207 (ISI Web of Science).

Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Daukševičius, R. 2011 Rod-shaped piezoelectric actuator with radial polarization, *Journal of Vibroengineering* 13(2). Vilnius: Vibromechanika, 358–364. ISSN 1392-8716 (ISI Web of Science).

Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Bansevičius, R. 2013. Investigation of oscillations of the piezoelectric actuator with two-directional polarization, *Mechatronic Systems and Materials IV. Solid State Phenomena* 4. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 328–333. (Solid State Phenomena, Vol. 4, ISSN 1392-4044). ISSN 1012-0394 (ISI Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Bansevičius, R. 2009.Modeling and analysis of multi-dof piezoelectric actuator with two directional polarization, in *Mechanika-2009: proceedings of the 14th international conference*, April 2–3, 2009, Kaunas University of Technology, Lithuania. Kaunas: Technologija, 255–258. ISSN 1822-2951.

Lučinskis, R.; Mažeika, D.; Hemsel, T.; Bansevičius, R. 2012. Multi-DOF cylindrical piezoelectric actuator with radial polarization, in *AIP Conference proceedings. International congress on ultrasonics*. Gdańsk, Poland, 5–8 September, 2011. *American Institute of Physics* 1433, 693–696. ISSN 0094-243X.

Mažeika, D.; Lučinskis, R.; Bansevičius, R. 2011. Investigation of contact point trajectories of piezoelectric actuator with bidirectional polarization, in *Vibration Problems ICOVP 2011: the 10th international conference on vibration problems*, Springer proceedings in physics, September 5–8, 2011, Prague, Czech Republic. Technical University of Liberec. Dordrecht: Springer 2011/139/495, 594–501. ISSN 0930-8989.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

One of the current trends of technological development of the piezoelectric actuators is associated with miniaturization and reduction of the complexity of design. The main objective of such systems development is to design a micro-scale system that has particular functionality and simple structural design. The development of the miniature actuators with multiple degrees of freedom (multi-DOF actuators) is relevant for such devices as mobile phones, personal digital assistants, cameras and etc.

Various principles of design are used for the development of actuators but the majority of multi-DOF actuators are based on superposition of longitudinal and flexural vibrations of the structure.

Topicality of the thesis

The performed work demonstrates that the proposed radially-polarized piezoelectric actuator is an effective solution for generation of a multi-DOF motion and. the actuator can control contact point trajectory by means of a specific topology of the electrodes and excitation regimes. The paper presents results of the numerical modeling as well as experimental obtained in the course of testing of the fabricated prototype of the actuator. The research work is finalized with formulation of the conclusions.

The object of research

The object of research is to define trajectories of multicomponent vibrations and excitation schemes for rod-shaped piezoelectric transducers with multidirectional vectors of polarization.

The aim of the thesis

The aim of this work is to adjust bipolar and radial polarization beam type piezoelectric transducers for multicomponent contact point trajectory generation, and to carry out on inquiry of the geometry of actuator and excitation schemes.

The tasks of the thesis

In order to achieve the above mentioned purpose, the following tasks had to be solved:

1. Perform analysis of literature on piezoelectric transducers constructions, operating principles and methods of making the motion trajectories.
2. Create the bi-polar and the radial polarization actuators numerical models and examine them.
3. Set bi-directional and radial polarization transducers geometry.
4. Create a bi-directional radial polarization and piezoelectric transducer electrode configuration algorithm for excitation of multi-DOF oscillations.
5. Fulfill experimental research of designed piezoelectric transducers and give conclusions and recommendations.

The research methods

Analytical, numerical and experimental methods were used in this work. Overview of related scientific work has been carried out in accordance with the methodology of systematic review of literature. Oscillation analysis of piezoelectric actuators was performed based on the general propagation of the solids theory of elastic vibrations. A numerical simulation of actuator models was carried out using the finite element method (FEM). An experimental study was carried out using the experimental planning methodology. Summarizing obtained results have been applied evaluative research method.

Scientific novelty

1. A search algorithm of electrode configuration was composed for the rod piezoelectric transducers with multi-polarization to excite multiple components oscillation of actuator.
2. An experimental study of actuator numerical models and actuator prototypes of the piezoelectric acturators with bipolar and radial polarization was conducted.

Practical significance of the obtained results

These results open up an opportunity to create a new generation of piezoelectric actuators for multiple degrees of freedom for ultrasound motors and positioning systems. Proposed piezoactuators are of a simple construction and easy to produce, i.e., today all

the necessary components are being manufactured. The simplicity of design allows creating the extremely small size converters, which further extend the application possibilities. Output link parameters, namely the contact point of the trajectory parameters, such as: elliptical trajectory plane, its size and ratio as well as the tilt angle and direction of movement is easily controlled by selecting the appropriate electrode excitation scheme, the excitation voltage amplitude and the phase difference between the excitation signal. So, the electrode topology algorithm and excitation schemes formation principles can be used to create a number of degrees of freedom actuators.

Defended statment

1. The piezoelectric actuator of two-polarization vector directions makes the generation of elliptical trajectories of contact point in perpendicular planes possible which can be adapted to generate slider movements of many degrees of freedom.
2. The rod shaped piezoelectric transducer of the radial polarization generates the vibrations of multiple components which can be adapted to generate slider movements of many degrees of freedom.
3. The rational selection of electrode configuration and the excitation schemes of actuator with omnidirectional polarization makes possible to generate the elliptical trajectories of the contact point in perpendicular planes.

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 (Vasilyev, Luchinskis 2008; Lučinskas, 2010; Lučinskis, 2011; Lučinskis, 2013), two – in materials of international conferences included in the Thomson ISI (ISI Proceedings) list (Lučinskas, 2009; Lučinskas, 2011), one – in materials of international conferences included in other international databases (Lučinskis, 2011)

Dissertation research results have been published in three international scientific conferences.

The structure of the dissertation

The scientific work consists of an introduction of the dissertation, 3 chapters, general conclusions, references, list of author's publications and annexes. The total scope of the dissertation – 111 pages, 51 indexed equations, 58 pictures, 10 tables. In a thesis have been used 99 references.

1. Piezoelectric actuators and their application in vibrating systems

In contrast to piezoelectric positioning devices for stroke operation, several types of piezoelectric linear motors have been developed, which, in principle, are to deliver an unlimited stroke. Their moving part, 'rotor', comes into contact with the stator by normal forces and is driven by frictional forces generated at interface. In this way, microscopic small motions of the stator, induced by piezoelectric elements, are transferred to a macroscopic linear motion of the rotor. The advantages of piezoelectric motors, such as high force density, simple mechanical construction, low speed without

additional gear or spindle mechanisms, noiseless operation, high holding forces without an energy supply, absence of magnetic fields, high dynamics and very good positioning accuracy, make them attractive for many industrial applications. In the following, we detail a survey of a broad range of piezoelectric linear motors types of drives mentioned are typical examples, but many other designs exist too.

2. Formation of elliptical trajectories on piezoelectric actuators with non-unidirectional polarization vectors

Contact point of 3 DOF actuator must produce elliptical motions in three perpendicular planes independently to move or rotate slider in three different directions. Flexural resonant oscillations in two perpendicular directions and longitudinal resonant oscillation of the beam is employed. Both flexural and longitudinal resonant frequencies of the beam must coincide to achieve appropriate elliptical motion of the contact point. Flexural oscillations of the beam type actuator can be obtained in two perpendicular directions at the same resonant frequency when structure is symmetric and bending stiffness of the structure in both directions is the same.

Based on these requirements, bulk piezoceramic beam with quadratic crosssection was chosen to build the actuator. The actuator was polarized in two perpendicular directions on the first and second half of the actuator (Fig. 1S).

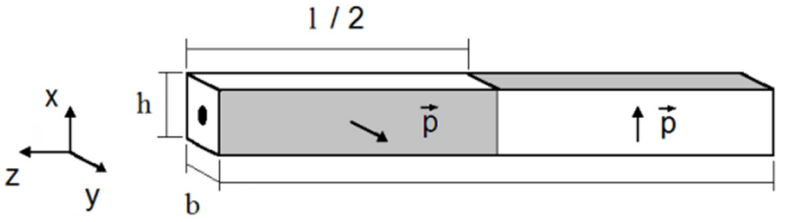


Fig. 1S. Principle scheme of the actuator

Both vectors of polarization are perpendicular to the longitudinal axis of the beam and d31 effect is used for generating mechanical motion. Quadratic cross-section and bidirectional polarization of the beam makes excitation of actuator in perpendiculars planes possible. Contact point of the actuator was defined at the middle of top surface of the actuator (Fig. 1S)

Multi-mode oscillations consisting of the 1st longitudinal and 3rd flexural oscillation modes of the beam were chosen as an operating mode of the actuator. These modes define particular dimensions of the beam and can be calculated by equalizing equations of resonant frequencies of longitudinal and flexural modes. In our case when the ratio of height and length of the beam type actuator is equal to 0.09.

Three different excitation schemes were defined (Fig. 2S):

No.1 – oscillations in *xz* plane are achieved when electrode a1, a3 are excited;

No.2 – oscillations in *yz* plane are achieved when electrode b1, b3 are excited;

No.3 – oscillations in *xyz* are achieved when electrode a1, a3, b2, b4 are excited.

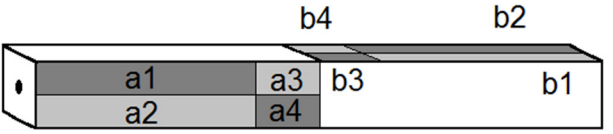


Fig. 2S. Final electrode pattern of the piezoelectric actuator

Proposed cylindrical piezoelectric actuator consists of a core metal rod placed inside piezoceramic hollow cylinder coated by thin silver electrode (Fig. 3S) The outer diameter of the core rod is fit to the inner diameter of the piezoceramic cylinder. The cylinder has radial polarization and polarization vector at each point of the cylinder is perpendicular to longitudinal axis and oriented in outward direction with respect to cylinder surface.

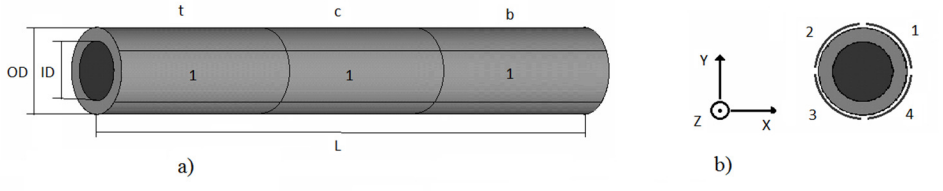


Fig. 3S. Scheme of the piezoelectric actuator with the sectioned electrode:
a) side view; b) top view

The metal rod is grounded and operates as a stator. The rod is used as internal electrode of the actuator as well. The surface of the outer electrode is divided into four sections 1, 2, 3, 4 with respect to the perimeter of the cylinder and three sections a, b, c along cylinder length. The dimensions of the piezoelectric actuator are chosen so that the resonant frequency of the 1st longitudinal mode coincides with the 3rd flexural mode. The required vibration mode is achieved in a selected plane by using an excitation that is accomplished by means of a particular electrode combination.

The following excitation schemes of electrodes are applied when it is necessary to induce vibrations in a selected particular plane:

No.1 – vibrations in xOz plane are generated when $\cos\alpha$ excitation signal is applied to electrode sections t1, t4, c2, c3, b1, b4 and $\cos(\alpha+\phi)$ signal – to t2, t3, c1, c4, b2, b3;

No.2 – vibrations in yOz plane are generated when $\cos\alpha$ excitation signal is applied to electrode sections t1, t2, c3, c4, b1, b2 and $\cos(\alpha+\phi)$ signal – to t3, t4, c1, c2, b3, b4;

No.3 – vibrations in xyz space are generated when $\cos\alpha$ excitation signal is applied to electrode sections t1, c1, c2, c3, c4, b1, $\cos(\alpha+\phi)$ signal – to t2, b2, $\cos(\alpha+\phi)$ signal – to t3, b3 and $\cos(\alpha+\phi)$ signal – to t4, b4.

The voltage of 10 V with phase difference of $\phi = \pi/2$ was used for excitation.

The material and dimensions of the piezoelectric actuator are chosen so that the resonant frequency of the 1st longitudinal mode coincides with the 3rd flexural mode. The dimensions of the piezoactuator are OD = 3.2 mm, ID = 2.2 mm, L = 27.6 mm. The

piezoelectric actuator was made from PI transducer PT130.00, which is manufactured from piezoceramic material of type PIC151. A brass was used for the core rod.

The pattern of electrode is very important for the beam type actuator because proper trajectory of the contact point is obtained by exiting particular electrode sections. The following algorithm how to find the electrode pattern of the actuator was suggested i.e. to find electrode pattern for longitudinal and flexural modes separately and then to combine them by defining intersecting areas.

The pattern of electrode for separate oscillation modes can be found referring to effective work of equivalent mechanical forces of the excited actuator that must be maximized. The effective work of piezoelectric actuator can be written as follows:

$$A_k^{ef} = \frac{\omega_k}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_k}} \sum_{i=0}^{n} \mathbf{y}_k^T \mathbf{F}_k \sin(\omega_k t)\, z_k \, dt \ , \tag{1S}$$

here

$$\mathbf{F} = \mathbf{L}\,\mathbf{T}\,\mathbf{W}\,\mathrm{sgn}(\phi) \ , \tag{2S}$$

where **F** is a vector of amplitudes of equivalent mechanical force in global coordinate system, $\mathbf{y}_k$ – is eigenvector of k mode, **W** is vector of excitation voltage amplitude, **L** is transformation matrix, **T** is electroelasticity matrix, ω_k is resonant frequency. Equation (2) shows relation between electric and mechanical fields. By evaluating product of the vectors, equation (1) could be written as follows:

$$A_k^{ef} = \frac{\omega_k}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_k}} \sum_{i=0}^{n} |\mathbf{y}_k|\,|\mathbf{F}_k| \cos\alpha_k \sin(\omega_k t)\, z_k \, dt \ . \tag{3S}$$

It can be seen from the equation (3), that effective work of the actuator strongly depends on the angle between vector of the amplitude of the equivalent mechanical force and eigenvector of particular mode. The pattern of electrodes of the beam type actuator can be defined by evaluating the values of *cos α*.

Numerical simulation was carried out by employing software ANSYS 11.0. The finite element model of piezoelectric actuator with bidirectional polarization was build. The following dimensions of the beam type actuator were used $b = h = 4$ mm and l = 39.5 mm. PIC255 piezoelectric ceramics was used for the modeling. No mechanical constrains were applied in the model. The proper natural frequencies were found at the following frequencies: 34.56 kHz (3rd flexural mode) and 35.34 kHz (1st longitudinal mode). Based on equation (4), values of *cos α* were calculated for these modes. The results of calculations are given in Figure 4S, where different grey colors represent positive and negative signs and represent electrode sections for direct and reverse motion. The pattern is given just in one plane for the better understanding.

The intersection of these two patterns gives the same electrode configuration as in Figure 4Sb. So the final the pattern of electrodes of the beam type actuator is given in Figure 4S.

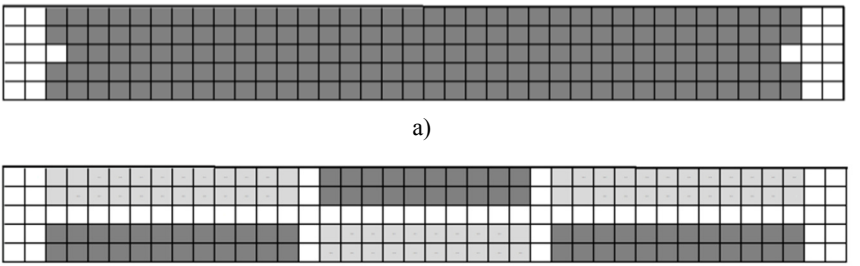


Fig. 4S. The pattern of electrodes of the bipolar actuator: a) for 1st longitudinal mode, and b) 3rd flexural mode

The numerical analysis of the cylindrical piezoelectric actuator started from the modal analysis with the purpose to obtain the required structural configuration of the piezoactuator, i.e. to determine a particular ratio of piezoactuator length L and diameter D as well as to define topology of electrodes that allows to achieve the 3rd flexural mode and the 1st longitudinal mode at the same resonant frequency.

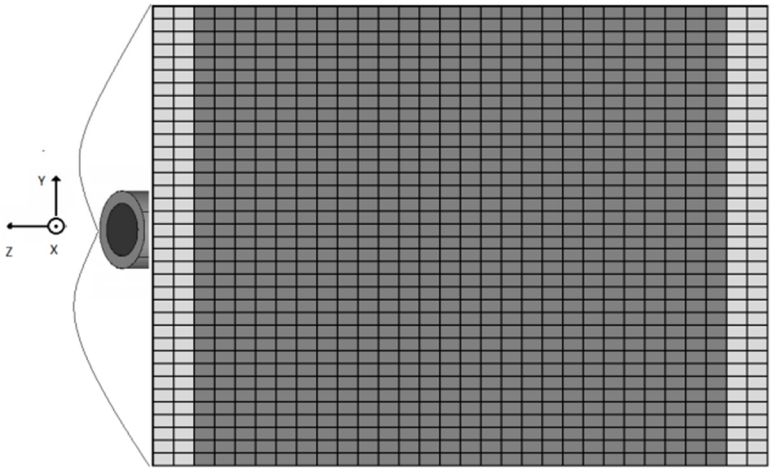


Fig. 5S. The pattern of electrodes of the cylindrical actuator for 1st longitudinal mode

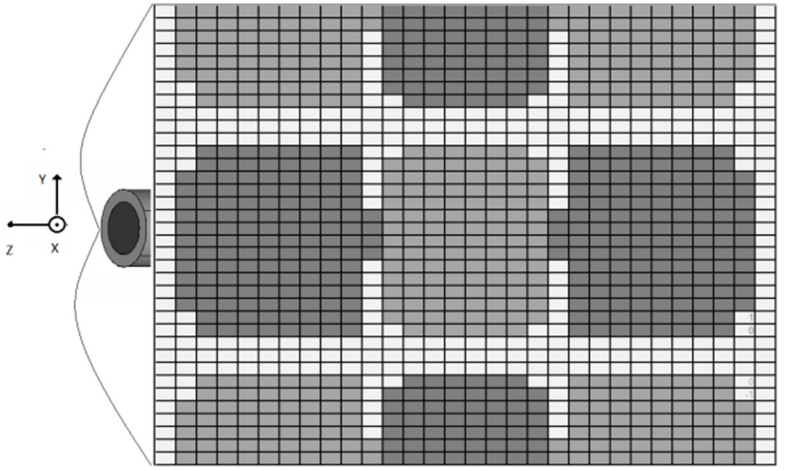


Fig. 6S. The pattern of electrodes of the cylindrical actuator for 3rd flexural mode

The first task was a determination of the required topology of electrodes since it influences the stiffness of the whole system. The model of the piezoelectric actuator was fabricated from PI transducer PT130.00, which is manufactured from piezoceramic material of type PIC151. The dimensions of the piezoactuator are D = 3.2 mm, d = 2.2 mm, L = 27.6 mm.

The results of calculations are given in Figure 5S and 6S, where different grey colors represent positive and negative signs and represent sections of electrodes for direct and reverse motion. The pattern is given just in one plane for a better understanding.

The harmonic response analysis of the bipolar actuator was performed at the frequency range from 0 kHz to 40 kHz with 100 Hz frequency step. Electrodes with numbers a1-a4 were excited (Fig. 4S). 100V harmonic signal was used for excitation. Oscillations of the contact point were analyzed. The elliptical type trajectory is being generated during the period of the oscillation that could be written in xz plane as follows:

$$\left.\begin{aligned} u_x &= a\cos\tau\ \cos\beta - b\sin\tau\ \sin\beta \\ u_z &= a\cos\tau\ \sin\beta + b\sin\tau\ \cos\beta \end{aligned}\right\}, \tag{4S}$$

where a and b are the length of major and minor semi-axis respectively, τ is the parameter and β is the rotation angle of the ellipse axis.

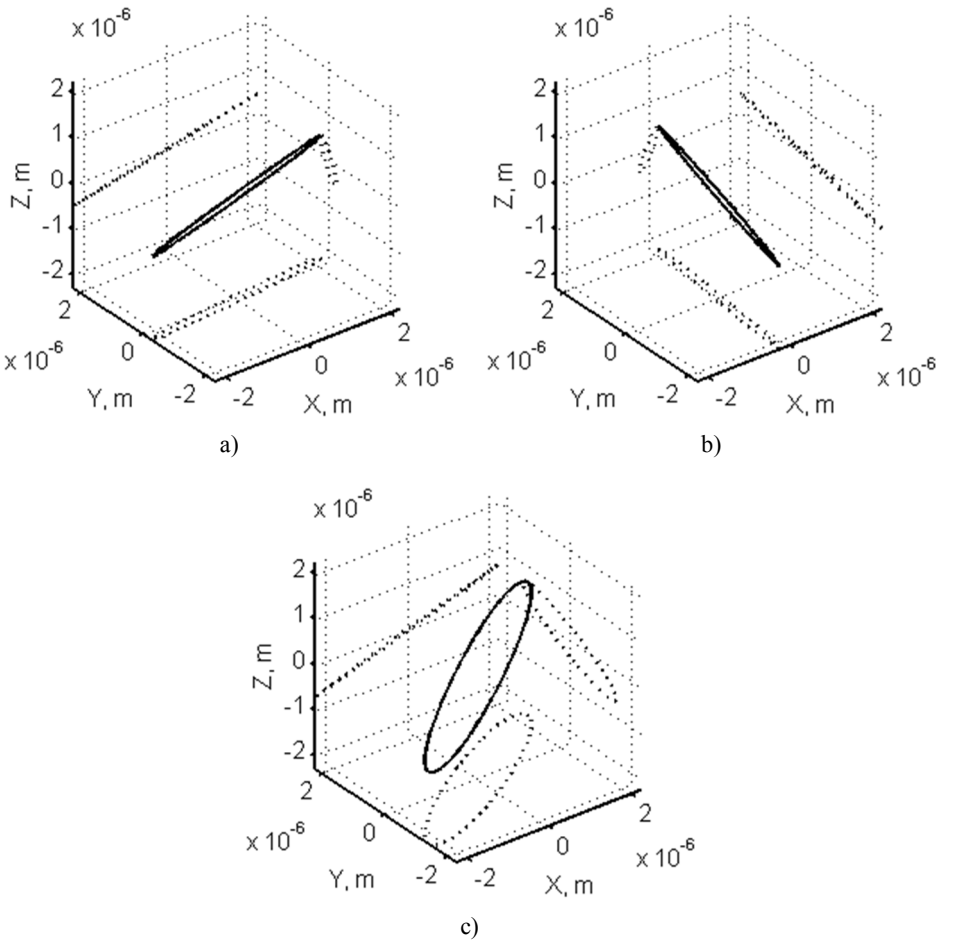


Fig. 7S. Simulated trajectories of the bipolar actuator contact point under different exciting schemes at 34.75 kHz: a) exitation scheme No.1, b) excitation scheme No.2, c) excitation scheme No.3

The trajectories of contact point movement are presented in Figure 7S when all defined schemes are applied. Major axis of elliptical trajectory of the contact point is almost parallel to *x* and *y* axis when excitation scheme No.1 and No.2 is used respectively. By observing these two ellipses it can be noticed that parameters of these ellipses are very similar (Table 1S). This means that quite stable and controllable motion of the slider should be achieved in *xy* plane. Rotational motion of the slider will be achieved based on the elliptical motion of the contact point, when excitation scheme No.3 is used.

The harmonic response analysis of cylindrical piezoelectric actuator was performed by sweeping through frequencies from 60 to 80 kHz with a 100 Hz step. The actuator

was modeled while not being clamped. The electrodes were formed by grouping nodes of the elements and assigning voltage 10 V or 0 V (in the case of grounding).

Figure 8S illustrates motion trajectories obtained from the simulations for the case when the piezoactuator vibrates in its 3rd flexural mode by applying the aforementioned excitation schemes No. 1 and No. 2. These results indicate that during excitation with the scheme No. 1 the trajectory of the contact point has major semi-axis that is parallel to the *x* axis. Excitation with the scheme No. 2 results in a motion trajectory with the major semi-axis being parallel to the *y* axis.

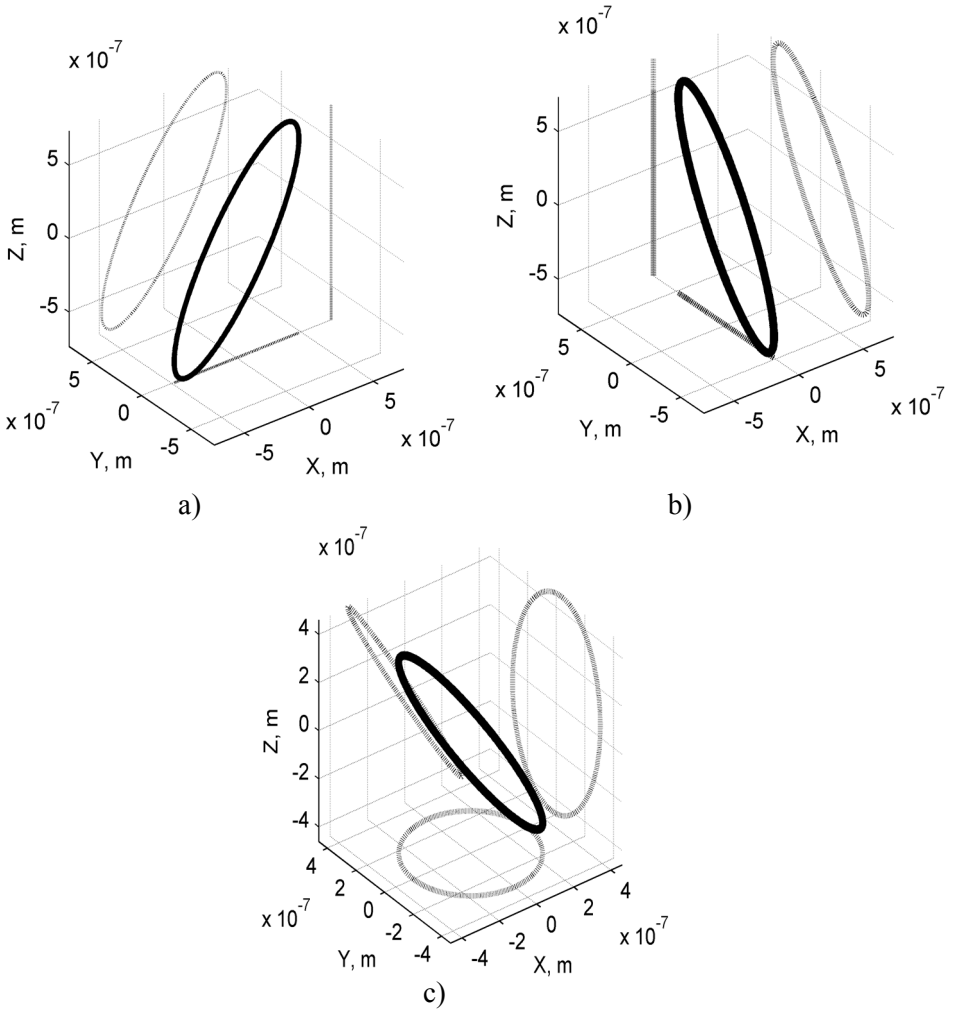


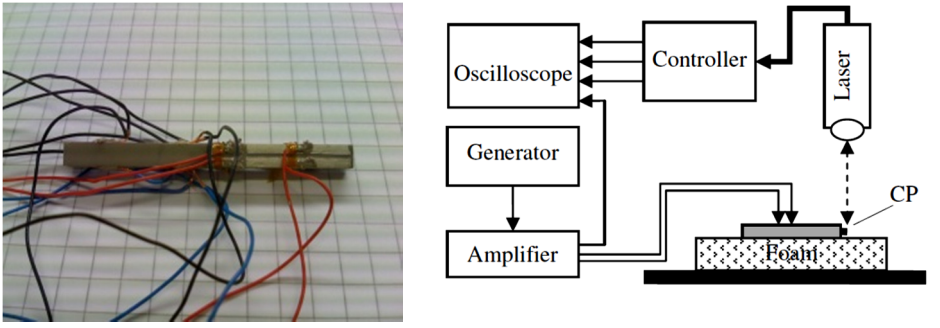
Fig. 8S. Simulated trajectories of the radial polarization actuator contact point under different excitation schemes at 74.25 kHz: a) exitation scheme No.1, b) excitation scheme No.2, c) excitation scheme No.3

During excitation with the scheme No. 3 the spatial trajectory is obtained that is suitable for generation of the rotational motion of a rotor (Fig. 8c). The top of the ellipse is located at a distance which is sufficiently large in order to induce a torque capable of moving the rotor.

The provided simulation results also demonstrate the amplitude variations for the longitudinal vibrations, which depend on quantity of excited electrodes. Larger excited area of the piezoactuator leads to a higher input energy, which, as a consequence, results in more intensive oscillations.

3. Experimental research of actuators

Prototype piezoelectric actuator with bidirectional polarization was made and experimental investigation was performed (Fig. 9S a). The same electrode pattern and excitation schemes of the actuator were used as during numerical simulation. A special stand for experiments was designed (Fig. 9S b). Oscillations of the actuator contact point were measured by a laser vibrometer (Polytec CLV-3D). The results of measurements are shown in Figures 10S and values of parameters are given in Table 1S and compared with corresponding results obtained from numerical simulation. It can be noticed, that elliptical motion of the contact point was achieved in three different planes.



a) b)

Fig. 9S. Bipolar actuator: a) prototype and b) the principal scheme of experimental setup

Measured angles of the ellipses axis in different planes are similar as obtained in numerical simulation but lengths of the semi-axis differ. This can be explained as damping influence of the foam that was used to put actuator during the experimental measurements.

Numerical and experimental investigation of the piezoelectric actuator with bidirectional polarization confirms that the elliptical trajectory of the contact point motion can be achieved in three directions. Algorithm for electrode pattern calculation was developed and a particular pattern for corresponding multimode oscillations was found. Three separate directions of the contact point elliptical motion were obtained during numerical simulation and experimentally. It means that 3DOF motion of the slider can be achieved. The results of numerical simulation and experimental measurements are in a good agreement.

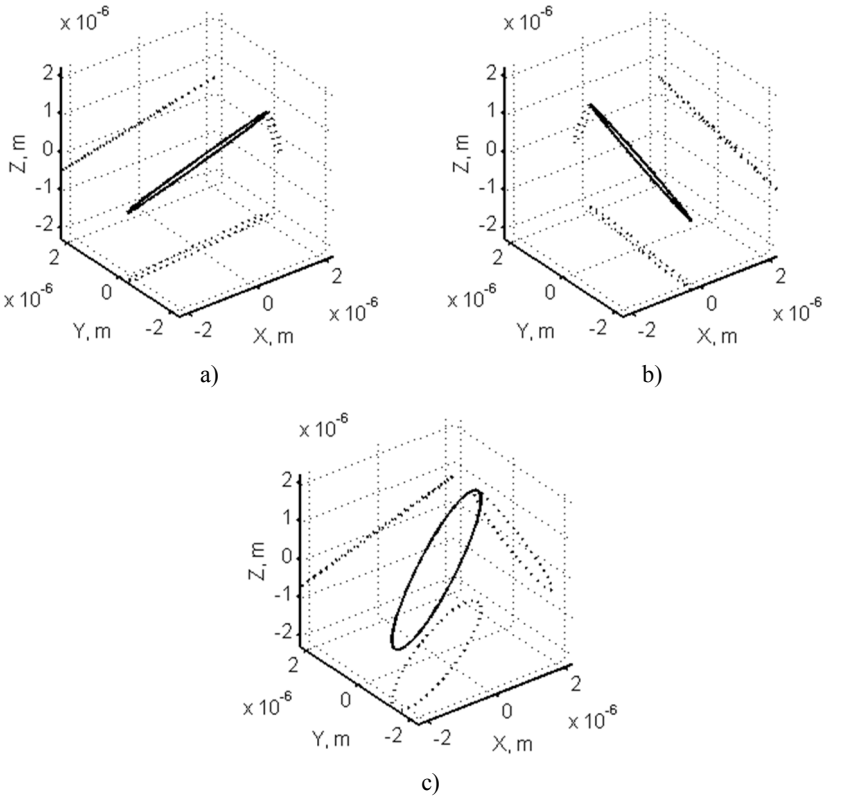


Fig. 10S. Measured trajectories of the bipolar actuator contact point under different excitation schemes at 34.75 kHz: a) exitation scheme No. 1, b) excitation scheme No. 2, c) excitation scheme No. 3

Table 1S. Numerically and experimentally obtained parameters of the ellipses on bipolar actuator

Parameters	Numerical results			Experimental results		
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3
Length of major semi-axis, μm	2.3	2.2	2.7	1.4	1.2	0.5
Length of minor semi-axis, μm	0.4	0.4	1.4	0.27	0.33	0.4
Axis angle in xy plane	4°	85°	61°	6°	88°	67°
Axis angle in xz plane	34°	72°	34°	30°	84°	61°
Axis angle in yz plane	98°	146°	139°	83°	127°	107°

The cylindrical piezoactuator (Fig. 11S) was driven by the 4-channel generator Wavetek 195 by employing the aforementioned electrode excitation schemes. Vibrations of the contact point of the piezoactuator were registered by means of laser Doppler vibrometer Polytec CLV-3D. The measured signal was processed by vibrometer controller Polytec CLV-3000. The excitation regimes (schemes and excitation voltage

amplitudes) used for the measurements fully corresponds to those applied during the simulations.

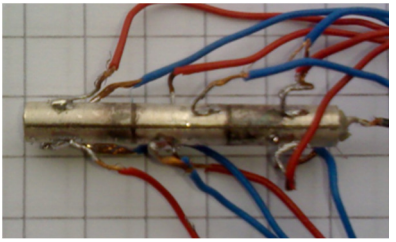


Fig. 11S. Prototype of cylindrical actuator

Figure 12S illustrates the measured contact point trajectories obtained when the piezoactuator was excited by applying earlier described excitation schemes.

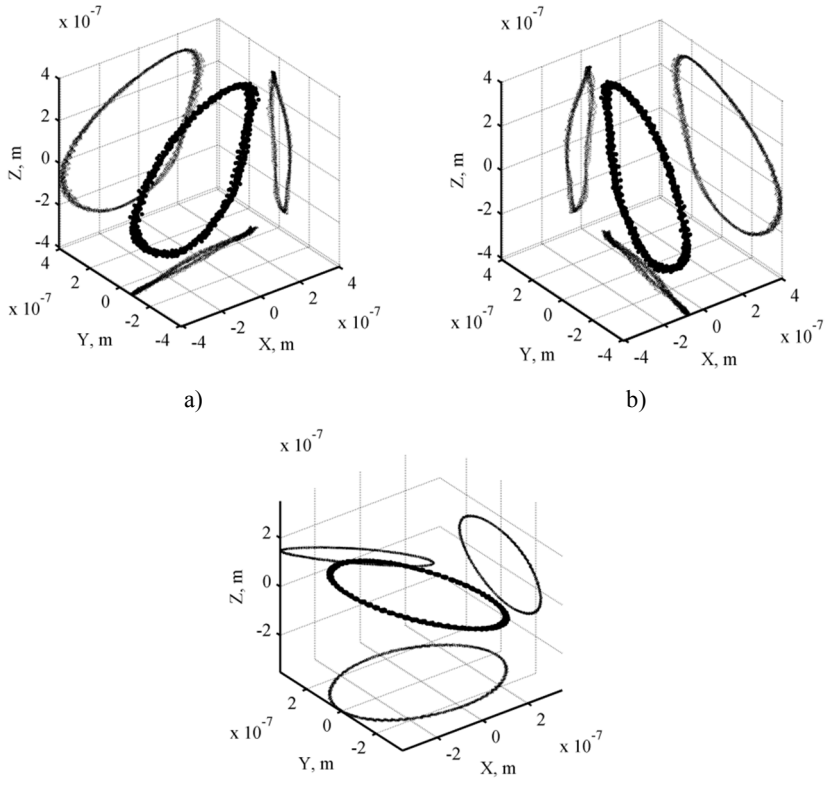


Fig. 12S. The measured trajectories of the radial polarization actuator contact point under different excitation schemes at 71 kHz: a) exitation scheme No. 1, b) excitation scheme No. 2, c) excitation scheme No. 3

The measurement results reveal that the experimental elliptical trajectories of the contact point are located in one plane, which again confirms the accuracy of the FE model. Detailed comparison between numerical and experimental results is given in Table 2S.

Table 2S. Numerically and experimentally obtained parameter of the ellipses on cylindrical actuator

Parameters	Numerical results			Experimental results		
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3
Length of major semi-axis, μm	0.518	0.517	0.511	0.395	0.397	0.392
Length of minor semi-axis, μm	0.262	0.263	0.509	0.256	0.255	0.354
Axis angle in xy plane	0°	90°	176°	-6°	10°	168°
Axis angle in xz plane	58°	90°	125°	28°	28°	158°
Axis angle in yz plane	90°	56°	103°	83°	78°	86°

Numerical and experimental investigation of the piezoelectric actuator with radial polarization confirms that elliptical trajectory of contact point motion can be achieved in three directions independently. Three separate directions of contact point of elliptical motion were obtained during numerical simulations and confirmed by experimental study. It demonstrates that a 3-DOF motion of the slider can be achieved. Results of the simulations and experimental measurements are in a good agreement and confirm the ability of the developed finite elements model of the piezoelectric actuator to provide sufficiently reliable numerical results.

General conclusions

1. Based on the literature review and analysis of scientific research of piezoelectric actuators it can be concluded that three degree of freedom motion of the slider is achieved by using several one degree of freedom actuators or regular shape piezoelectric actuator with complex excitations scheme. Complex control system must be used to achieve high accuracy of such piezoelectric devices therefore demand of a new design principles of three degree of freedom piezoelectric actuators arise.
2. Two innovative designs of rod piezoelectric transducers with multi-polarization were proposed. The numerical and experimental studies of the actuators have shown that the excitation of these actuators under corresponding electrode scheme, on harmonic electrical signal, it is possible to form multi-componental forms of vibrations of a contact point.
3. The geometrical relationship of the piezoelectric actuators dimensions with bi-directional and radial polarization were established so that the longitudinal and bending resonant frequencies of vibrations were equal. The dimensions of the square cross-section piezoelectric actuator with two polarization directions are: width – 4 mm, leght – 39.6 mm, i.e. the length and width ratio is equal 9.9. The dimensions of radial polarization actuator are: diameter – 3.2 mm, length – 27.3 mm, and the ratio of the length and diameter is equal 8.5. This makes it possible to create a universal electrode topology which ensures the possibility of changing the plane of oscillations by changing the phase difference between the excitation signals.

4. An algorithm of electrode configuration to excite longitudinal and bending modes of vibration at the same frequency in piezoelectric actuators of bi-directional and radial polarization was composed. For each model of actuator set of three unique excitation topologies, generating the elliptical trajectories of contact point in three different planes.
5. The numerical models of proposed piezoelectric actuators were created and harmonic response analysis of these models was performed to define excitation shemes of actuators. The numerical and experimental study showed that the selection of electrodes and excitation signal amplitude and the phase difference between the excitation signals can easily change the plane of the elliptical trajectory of the contact point and ellipse tilt angle.
6. The numerical and experimental results of a comparative analysis confirmed that all the results obtained by numerical and experimental study of the two transducers models are equivalent. In general the difference between the results did not exceed 7%.

Priedai[1]

A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

[1] Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Raimundas LUČINSKIS

PJEZOELEKTRINIŲ KEITIKLIŲ SU ĮVAIRIAKRYPČIAIS POLIARIZAVIMO VEKTORIAIS VIRPESIŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

Raimundas LUČINSKIS

INVESTIGATION OF OSCILATIONS OF PIEZOELECTRIC ACTUATORS WITH MULTIDIRECTIONAL POLARIZATION VECTORS

Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Mechanical Engineering (09T)

2014 01 10. 10 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