

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS

IGNAS GRYBAS

**AUKŠTOS SKYROS PJEZOELEKTRINIO SUKAMOJO  
STALIUKO KŪRIMAS IR TYRIMAS**

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

2017, Kaunas

Disertacija rengta 2013–2017 metais Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

**Mokslinis vadovas:**

Habil. dr. Algimantas Bubulis (Kauno technologijos universitetas, technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija, 09T).

**Redagavo:** Rozita Znamenskaitė (Leidykla „Technologija“)

**Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:**

Prof. habil. dr. Arvydas PALEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija, 09T) – **pirmininkas**;

Dr. Rolanas DAUKŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija, 09T);

Prof. dr. Eugenija KOROBKO (Baltarusijos A.V. Lykovo Šilumos masės ir mainų institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, 08T);

Prof. dr. Dalius MAŽEIKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija, 09T).

Disertacija bus ginama viešame mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2017 m. spalio 6 d. 10 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

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

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas [doktorantura@ktu.lt](mailto:doktorantura@ktu.lt).

Disertacijos santrauka išsiųsta 2017 m. rugsėjo 6 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

## **ĮVADAS**

### **Temos aktualumas**

Tikslus kampinis pozicionavimas dažnai daro didelę įtaką daugelio šiuolaikinių įvairaus dydžio elektromechaninių ir mechatroninių prietaisų bei sistemų veikimui, kurios, labai tikėtina, taps nanometrų eilės dydžio artimiausiu metu. Žinoma, jog tokiose srityse, kaip mikroskopija, metrologija, precizinis apdirbimas, biomedicina ir kt., kampinių (sukamųjų) pozicionavimo staliukų taikymas yra aktualus [1–7].

Įprasti (elektromagnetiniai) varikliai, kuriami ir naudojami kaip vykdikliai tiksluose pozicionavimo įrenginiuose, ypač – aukšto techninio lygio produktuose (pvz., mobiliuosiuose medicininiuose robotuose, vaistų tiekimo pacientui sistemose, kosmoso palydovuose, išmaniosiose fotokameros, rankiniuose laikrodžiuose ir t. t.), nebegali atitikti nuolat keliamų techninių reikalavimų, įskaitant (tačiau neapsiribojant) kompaktiškumą, paprastą struktūrą, didelį tikslumą bei mažus gamybos kaštus. Minėtų variklių trūkumai taip pat apima veikimo metu skleidžiamą triukšmą, atsirandantį praslydimą, radialinį ir ašinį rotoriaus klibėjimą, lėtą sistemos atsaką ir pan., todėl daug pastangų dedama pasauliniu mastu siekiant surasti alternatyvas šioms varikliams. Elektrostatinium, magnetrostrikciniu, fototerminiu, fotoelektriniu, termoelektriniu, formą išlaikančiu bei kitais principais pagrįsti varikliai laikomi potencialiais variantais [8]. Visgi dėl savo privalumų pjezoelektriniai varikliai (ypač – rezonansinio ultragarsinio tipo) sudaro bene žinomiausią kategoriją. Tą labiausiai lemia šių prietaisų galimybė atitikti daugelį anksčiau minėtų reikalavimų ir pasižymėti tokiomis savybėmis, kaip didelė greitaveika, palyginti didelis sukimo momentas esant mažam sukimosi greičiui, elektromagnetinių trikdžių nebuvimas, žemas triukšmo lygis ir t. t.

Nors rezonansiniai ultragarsiniai stovinčiosios bangos varikliai iki šiol buvo išsamiai tiriami kaip galimi varikliai sukamiesiems staliukams ir pozicionavimo prietaisams, jų praktinį naudojimą vis dar riboja trūkumai, susiję su nepakankamai dideliu tikslumu ir kompaktiškumu, konstrukcijos sudėtingumu, besidėvinčiais tiesiogiai sąveikaujančiais paviršiais bei palyginti dideliais gamybos kaštais. Todėl ieškoma įvairių konstrukcinių ir technologinių metodų minėtiems trūkumams pašalinti/sumažinti ir dėl jų kylančioms problemoms išspręsti.

### **Tyrimo tikslas ir uždaviniai**

Tyrimo tikslas – sukurti, pagaminti ir ištirti aukštos skyros pjezoelektrinį stovinčiosiomis bangomis sužadinamą sukamąjį staliuką su integruotomis inkrementinėmis skalėmis.

Tikslui pasiekti buvo suformuluoti tokie uždaviniai.

1. Atlikti išsamią literatūros apžvalgą, susietą su žinomais tiksliais sukamaisiais staliukais, didžiausią dėmesį skiriant pjezoelektriniams staliukams, ir įvertinti inkrementinių skalių panaudojimo galimybes staliuko aukštos skyros judesiui pasiekti.
2. Sudaryti analitinį ir skaitinį modelį pjezocilindro vibrosmūginės sąveikos su rotoriumi dinamikai bei pereinamiesiems atsakams ištirti.
3. Eksperimentiškai ištirti aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko dinamines charakteristikas ir nustatyti jų priklausomybes nuo žadinimo signalo bei išorinės apkrovos.
4. Pagaminti bei eksperimentiškai ištirti polimerines inkrementines skales bekontaktiniu ir kontaktiniu metodu siekiant įvertinti jų paviršiaus morfologiją bei optines savybes.
5. Sukurti aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko su integruota grįžtamojo ryšio valdymo sistema geometrinį virtualų ir fizinį modelį.

## **Tyrimų metodika**

Šis darbas buvo parengtas taikant teorinius ir eksperimentinius tyrimų metodus. Teorinė analizė atlikta analitiniu bei skaitiniu metodu, taikant *SolidWorks 2016*, *ANSYS 17.1*, *Matlab 2016* ir *Borland C++ Builder 6* programinius paketus. Siekiant papildomai atvaizduoti kuriamą objektą buvo panaudota *Autodesk 3ds Max* programinė įranga.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute ir Medžiagų mokslo institute.

Eksperimentinių tyrimų metu analizatorius *Wayne Kerr 6500B* buvo panaudotas pjezoelemento impedanso charakteristikoms nustatyti, trimatė (3D) skenuojančioji lazerinės Doplerio vibrometrijos sistema *Polytec PSV-500-3D-HV* – pjezocilindro viršutinio paviršiaus poslinkiui nustatyti ir kontaktinių zonų judesio trajektorijoms suformuoti; pjezocilindro paviršiaus poslinkis kokybiniu požiūriu buvo įvertintas taikant holografinės interferometrijos veikimo principu paremtą matavimo sistemą *PRISM 100 (Hytec)*; naudojantis vieno taško lazerinės Doplerio vibrometrijos sistema *Polytec* kartu su papildoma įranga buvo išmatuotos visos svarbiausios pjezoelektrinio sukamojo staliuko dinaminės charakteristikos; inkrementinės polimerinės skalės buvo suformuotos vakuuminio nusodinimo iš garų fazės įrenginiu *YBH-71D*, optinės litografijos įranga bei reaktyviojo joninio ėsdinimo įrenginiu *PK-2420RIE*.

## **Mokslinis naujumas**

Šiame darbe pateikiami toliau išvardyti moksliniai pasiekimai.

1. Pjezocilindro elektrodų topologija, kuri užtikrina pjezocilindro trijų aktyvių kontaktinių zonų elementų elipsės formos judesio trajektorijų

- sukūrimą; šių trajektorijų įtaka pjezoelektrinio sukamojo staliuko dinaminėms charakteristikoms.
2. Sutelktų parametrų analitinis ir paskirstytų parametrų baigtinių elementų modelis, kuriame įvertinama vibrosmūginė sąveika tarp pjezocilindro ir rotoriaus; baigtinių elementų modelis, leidžiantis nustatyti rotoriaus atsaką laiko atžvilgiu, priklausantį nuo išorinės apkrovos.
  3. Eksperimentiškai ištirtos aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko dinaminės charakteristikos, priklausančios nuo sužadavimo signalo ir išorinės apkrovos.
  4. Naujo tipo inkrementinės polimerinės skalės, kurios gali būti taikomos pakeičiant įprastai naudojamas inkrementines stiklo–chromo skales pjezoelektrinių staliukų tiksliam kampiniam pozicionavimui užtikrinti.

### **Ginamieji teiginiai**

1. Originalus pjezoelektrinis sukamasis staliukas, kurio pjezocilindre sužadunami stovinčiosios bangos virpesiai užtikrina aukštos skyros dvikryptį rotoriaus judesį.
2. Sudarytas pjezocilindro baigtinių elementų modelis atitinka eksperimentinį modelį ir leidžia tiksliai nustatyti kontaktinių zonų elementų judesio trajektorijas.
3. Rotoriaus judesio tolygumas priklauso nuo pjezocilindro sužadavimo dažnio rezonansinio dažnio atžvilgiu bei oro tarpelio tarp rotoriaus ir pjezocilindro kontaktinės zonos elemento.
4. Suformuotos naujo tipo inkrementinės polimerinės skalės paviršiaus kokybės ir rastrinių elementų tikslumo atžvilgiu prilygsta įprastai naudojamoms inkrementinėms stiklo–chromo skalėms, todėl potencialiai gali pakeisti šias pjezoelektriniuose staliukuose reikalingam kampinio pozicionavimo tikslumo lygiui užtikrinti.

### **Praktinė vertė**

Sukurtas, pagamintas ir ištirtas pjezoelektrinis sukamasis staliukas gali būti taikomas optiniu mikroskopu analizuojamo objekto aukštos skyros kampiniam poslinkiui užtikrinti, optiniams elementams pozicionuoti atliekant mokslinius/pramoninius tyrimus, skystiems vaistams (bio)medicininėje įrangoje dozuoti ir t. t. Jis taip pat gali būti naudojamas kaip mokomoji priemonė siekiant pademonstruoti mechatroninių sistemų galimybes.

Suformuotos inkrementinės polimerinės skalės gali būti taikomos preciziniuose sukamuosiuose enkoderiuose ir pozicionavimo sistemose, pakeičiant įprastai naudojamas inkrementines stiklo–chromo skales, ir yra pranašesnės už šias kainos bei efektyvumo santykiu atžvilgiu.

Sukurtas ir pagamintas aukštos skyros pjezoelektrinis sukamasis staliukas su integruota grįžtamojo ryšio valdymo sistema, kuris svarbiausių techninių charakteristikų atžvilgiu yra prilyginamas (arba konkurencingesnis) rinkoje esantiems produktams, tačiau ekonomiškumo požiūriu yra pranašesnis.

## **Disertacijos apibavimas**

Disertacijoje pateikti tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniose publikacijose: keturiuose straipsniuose *Web of Science* duomenų bazėje referuojamuose leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą, viename straipsnyje kitoje tarptautinėje duomenų bazėje referuojamame leidinyje ir dviejuose Lietuvos patentuose.

Pagrindiniai darbo rezultatai buvo pristatyti keturiuose tarptautinėse konferencijose: *Vibroengineering-2013* (Druskininkai, Lietuva), *Mechanika 2014* (Kaunas, Lietuva), *Vibroengineering-2014* (Katowice, Lenkija), ir *International Conference on Advances in Vibrations, 2015* (Porto, Portugalija).

## **Darbo apimtis**

Darbą sudaro įvadas, penki skyriai, išvados, 145 literatūros šaltinių sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas ir penki priedai. Disertacijos apimtis – 150 puslapių, 40 formulių, 114 iliustracijų ir 16 lentelių.

## **1. LITERATŪROS APŽVALGA**

Tikslus kampinis pozicionavimas dažnai daro didelę įtaką veikimui daugelio šiuolaikinių įvairaus dydžio elektromechaninių ir mechatroninių prietaisų bei sistemų, kurios turėtų tapti nanometrų eilės dydžio artimiausiu metu. Žinoma, jog tokiose srityse, kaip mikroskopija, metrologija, precizinis apdirbimas, biomedicina ir kt., kampinių (sukamųjų) pozicionavimo staliukų taikymas yra aktualus [1–7].

Įprasti (elektromagnetiniai) varikliai, kuriami ir plačiai naudojami visame pasaulyje kaip vykdykliai tiksluose pozicionavimo įrenginiuose, yra itin reikšmingi mūsų visuomenei įvairiose mokslo ir pramonės šakose. Nuolat augantis poreikis aukšto techninio lygio produktams (pvz., mobiliesiems medicininiais robotams, vaistų tiekimo pacientui sistemoms, kosmoso palydovams, išmaniosioms fotokameroms, rankiniams laikrodžiams ir t. t.) kelia vis naujus techninius reikalavimus varikliams, įskaitant (tačiau neapsiribojant) kompaktiškumą, paprastą struktūrą, didelį tikslumą bei mažus gamybos kaštus. Vis dėlto įprastų variklių struktūra ir veikimo principas lemia ribotas galimybes atitikti minėtus reikalavimus. Todėl daug pastangų dedama pasauliniu mastu siekiant surasti alternatyvas šiems varikliams. Elektrostatiniai, magnetostrikciniai, fototerminiai, fotoelektriniai, termoelektriniai, formą išlaikančiu bei kitais principais pagrįsti varikliai laikomi potencialiais variantais [8]. Visgi dėl savo privalumų pjezoelektriniai varikliai (ypač – rezonansinio ultragarsinio tipo)

sudaro bene žinomiausią kategoriją. Tą labiausiai lemia šių prietaisų galimybė atitikti daugelį anksčiau minėtų reikalavimų ir pasižymėti tokiomis savybėmis, kaip didelė greitaveika, palyginti didelis sukimo momentas esant mažam sukimosi greičiui, elektromagnetinių trikdžių nebuvimas, žemas triukšmo lygis ir t. t. Pjezoelektrinio variklio pagrindinė dalis – pjezoelektrinis keitiklis, keičiantis elektros energiją mechanine. Šiuolaikiniai pjezoelektriniai varikliai naudojami įvairiuose procesuose, kuriuose reikalingas mikro-/nanoeilės tikslumas. Pjezovykdkliai, pasižymėdami kokybe, yra taikomi medicinos inžinerijoje, aviacijoje, branduoliniame sektoriuje, automobilių pramonėje ir pan.

Egzistuoja dvi pjezoelektrinių variklių, naudojamų kampo pozicionavimo staliukuose, pagrindinės grupės.

#### 1. Nerezonansiniai (kvazistatiniai)

a) Žingsniniai varikliai. Jie susideda iš kelių pjezovykdklių, integruotų mechaninėje struktūroje, siekiant sukurti judesį, paremtą „išsiplėtimo–susitraukimo“ ciklą seka [9]. Visi žingsniniai varikliai pasižymi gana dideliu standumu, sukuriama jėga ir/ar sukimo momentu, tačiau mažu greičiu, sudėtinga sandara bei valdymu. Taip pat žinoma keletas trūkumų, susijusių su patikimumu bei taikymu mažoje erdvėje, ir silpnų signalų matavimu [10].

b) Inerciniai varikliai. Jie funkcionuoja remdamiesi judančios masės sąveika su pjezovykdkliu, panaudodami tarpinę jungtį. Šie varikliai – kompaktiški ir gana paprasti konstrukcijos atžvilgiu. Be to, jie pasižymi visai paprastu veikimo principu, dideliu tikslumu ir aukšta skyra. Antra vertus, jiems būdingos savybės – polinkis virpėti ir ne itin didelis standumas, o dėl kvazistatinio veikimo, trinties poros mechanizmo ir slydimo trinties įtakos variklių sukuriamas kampinis greitis, sukimo momentas bei efektyvumas yra gana mažas [9–11].

#### 2. Rezonansiniai ultragarsiniai

Iš visų pjezoelektrinių variklių rezonansiniai ultragarsiniai (daugiau nei 20 kHz) yra labiausiai ištirti [12]. Šiuo atveju rezonansiniai mechaniniai virpesiai naudojami kaip varančioji jėga. Tokių variklių veikimo principas paremtas pjezoelemento ciklinio judesio keitimu rotoriaus efektyviu darbu panaudojant trinties porą tarp šių komponentų [8]. Pagal elipsinio judesio sukūrimo būdą rezonansiniai ultragarsiniai varikliai išskiriami į stovinčiosios ir bėgančiosios bangos tipus.

a) Stovinčiosios bangos varikliai. Judesiu sukurti juose daugiausia taikomos išilginės, lenkimo, sukimo bei radialinės virpesių modos arba jų kombinuotos modos. Iki šiol varikliai, kuriuose taikoma išilginė–lenkimo moda, sudaro didžiausią pjezoelektrinių rezonansinių ultragarsinių variklių grupę. Jiems būdingas didelis pasiekiamas greitis ir sukimo momentas, nesudėtingas sužadinimas, paprastas pjezoelemento tvirtinimas atramomis mazginiuose taškuose/linijose, teorinis efektyvumas iki 16 % bei sumažėję gamybos kaštai (dėl vieno šaltinio virpesiams sužadinti). Trūkumai apima nepakankamai didelį

tikslumą ir dydžio kintamumą (kai kuriais atvejais), konstrukcijos sudėtingumą ir netolygų rotoriaus judesį, kuris lemia tiesiogiai sąveikaujančių paviršių dėvėjimąsi [8–10].

b) Bėgančiosios bangos varikliai. Judesiui sukurti juose naudojamos dvi suderintos stovinčiosios bangos, kurių fazės skiriasi  $90^\circ$ . Skirtingai nei stovinčiosios bangos varikliuose, rotoriaus judesys nesukuriamas tik viename pjezoelemento taške; vietoj to pjezoelemento kiekvieno taško judesio trajektorija apibrėžiama elipsės formos kreive dėl išilginių ir skersinių bangų kombinacijos. Šios variklių grupės privalumai – didelis tikslumas bei sumažėjęs tiesiogiai sąveikaujančių paviršių dėvėjimasis dėl tolygaus rotoriaus judesio. Trūkumai: trumpas veikimo laikas (dėl šilumos išsiskyrimo pjezoelemente), nelengvas konstrukcijos sumažinimas (dėl sudėtingos viso statoriaus sandaros) bei padidėję gamybos kaštai (dėl dviejų šaltinių virpesiams sužadinti) [9–10, 13].

Aukšta skyra – itin svarbi šiuolaikinių pjezoelektrinių sukamųjų staliukų savybė. Remiantis [9], skyra yra mažiausias mechaninis žingsnis, kurį įrenginys (ar jo dalis) gali atlikti judėdamas nuo vieno taško iki kito, todėl labai svarbu preciziškai matuoti minėtų staliukų kampinį poslinkį. Neabejojama, jog pjezoelektrinės medžiagos gali sukurti tikslų staliukų judesį, bet rimti iššūkiai atsiranda norint tinkamai jį registruoti. Tam didelę įtaką turi staliuko dinaminiai parametrai, staliuko bei pozicinuojamo objekto masė ir kiti veiksniai. Skaitmeniniai sukamieji enkoderiai yra bene labiausiai paplitusi priemonė kampiniam poslinkiui/padėčiai nustatyti. Enkoderių veikimo principas paremtas vienu iš šių metodų [14]: 1) optiniu; 2) slystančio kontakto; 3) magnetinės soties; 4) artumo jutimu. Nors jie visi plačiai taikomi, pirmajam teikiama daugiausia dėmesio, kai svarbi skyra, kompaktiškumas bei patikimumas. Inkrementinio optinio enkoderio išėjimo signalas gali būti gaunamas geometrinio maskavimo (šviesos pralaidumo arba atspindžio principu), Muaro efekto ir lazerinės interferencijos (interferencinio nuskaitymo) būdu. Apžvelgus literatūrą galima teigti, jog optinio atspindžio metodas labiausiai tinka taikymams, kuriems reikalinga nedidelė erdvė, aukšta skyra bei nedidelis kainos–kokybės santykis.

Apskritimo formos gardelės tipo inkrementinės skalės – vienas iš pagrindinių optinio sukamojo enkoderio elementų. Kadangi šios skalės būtinos pjezoelektrinių sukamųjų staliukų kampiniam poslinkiui matuoti, jos turi būti ne tik kokybiškos bei patikimos, tačiau ir pasižymėti konkurencingu kainos–efektyvumo santykiu. Ieškant alternatyvų, gamybos technologijos ir medžiagos privalo būti išsamiai apsvarstytos pirmiausia. UV-nanoįspaudimas yra labiausiai taikoma nanoįspaudimo litografijos rūšis, nes gamybos procesas trunka trumpai, suformuotos struktūros yra tikslios, reikalinga nedidelė štampos įspaudimo jėga, o pats procesas gali būti atliekamas esant įprastai darbo aplinkos temperatūrai. Įvairios polietileno tereftalato (PET) savybės lemia tai, kad ši medžiaga yra viena iš turinčių daugiausia galimybių būti panaudota kaip padėklas formuojant naujo tipo inkrementines polimerines skales.



## 2. TEORINIAI AUKŠTOS SKYROS SUKAMOJO STALIUKO TYRIMAI

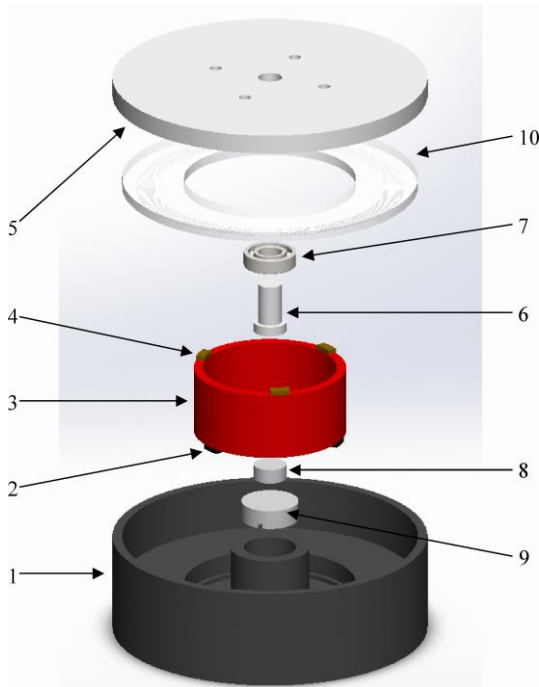
### 2.1. Staliuko konstrukcija ir veikimo principas

Aukštos skyros pjezoelektrinis sukamasis staliukas buvo kuriamas bendradarbiaujant su Lietuvos aukštųjų technologijų įmone UAB „Precizika Metrology“, kurioje gaminamos skirtingos modernios matavimo sistemos, sukamieji enkoderiai ir inkrementinės skalės (limbai). Atsižvelgiant į kompanijos veiklos sritis, kompetenciją, technologines galimybes ir reikalavimus, buvo nuspręsta dėl tokio staliuko formos, matmenų bei charakteristikų, kuris būtų inovatyvus moksliniu požiūriu ir konkurencingas komercinėje rinkoje.

Koncepcinio staliuko konstrukcijos geometriniam modeliui sukurti buvo pasirinkta *SolidWorks 2016* programinė įranga. „Išskleistas“ trimatis surinkto staliuko vaizdas pateiktas 2.1 pav. Staliuko gabaritiniai matmenys –  $\varnothing 66 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ . Nagrinėjamą objektą sudaro anoduoto aliuminio korpusas ( $\varnothing 66 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ ) (1), trys minkštos gumos atraminiai pagrindo elementai ( $4 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ ) (2), pjezokeraminis (*PZT-401, Morgan Advanced Materials*) cilindras ( $\varnothing 32 \text{ mm} \times \varnothing 28 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ ) (3), trys frikciniai kontaktinių zonų elementai ( $4 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ ) (4), nerūdijančio plieno rotorius ( $\varnothing 66 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ) (5) su ašele (6), precizinis nerūdijančio plieno guolis SKF ( $\varnothing 10 \text{ mm} \times \varnothing 5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ) (7), neodimio magnetas N42 ( $\varnothing 6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ) (8), antimagnetinė medžiaga ( $\varnothing 12 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ) (9), inkrementinė stiklo–chromo (periodas –  $80 \mu\text{m}$ ) skalė ( $\varnothing 64 \text{ mm} \times \varnothing 32 \times 4 \text{ mm}$ ) (10) ir labai maža optinė galvutė su poslinkio nuskaitymo mikroschema (*Avago AEDR-8400, 3 \times 3,2 \times 1,3 \text{ mm}^3*), pritvirtinta prie korpuso (neparodyta iliustracijoje).

Kai sustiprintas vienos fazės aukštojo dažnio elektrinis signalas  $U \cos(\omega t)$  yra tiekiamas į vieną iš pjezocilindro trijų tarpusavyje sujungtų elektrodų (išdėstyti kas  $120^\circ$ ) grupę, jame sužadunami rezonansiniai stovinčiosios bangos virpesiai (rotoriaus judesiui sukurti taikoma kombinuota tangentinė–ašinė virpesių moda). Pjezocilindras yra pritvirtintas prie pagrindo trimis tolygiai išdėstytais atraminiais elementais. Pjezocilindro viršutinis paviršius sąveikauja su rotoriumi trimis kontaktinių zonų elementais, tolygiai išdėstytais vienoje plokštumoje staliuko sukimosi ašies ( $Z$  kryptimi) atžvilgiu. Staliuko sukamasis judesys sukeliama trinties jėga, veikiančia tarp kontaktinių zonų elementų ir rotoriaus. Rotoriaus ašelė yra nejudamai įtvirtinta preciziniame guolyje, centruojančiame rotorių plokštumoje, kuri yra statmena jo sukimosi ašiai. Neodimio magnetas užtikrina pakankamą tolygią nuolatinę traukos jėgą tarp staliuko korpuso ir rotoriaus. Be to, magnetas centruoja rotorių jo sukimosi ašies atžvilgiu. Minėta guolio ir magneto kombinacija leidžia užtikrinti reikalingą radialinės bei ašinės apkrovos pusiausvyrą, kuri lemia staliuko tolygų sukamąjį judesį. Sužadinant kitą pjezocilindro trijų tarpusavyje sujungtų elektrodų (išdėstyti kas  $120^\circ$ ) grupę, sukamojo judesio kryptis tampa priešinga. Rotoriaus kampinis poslinkis/padėtis nustatoma panaudojant optinį enkoderį, susidedantį iš

inkrementinės stiklo–chromo gardelės tipo skalės, pritvirtintos prie rotoriaus apatinio paviršiaus, ir itin mažos optinės galvutės su poslinkio nuskaitymo mikroschema, pritvirtintos prie staliuko korpuso.

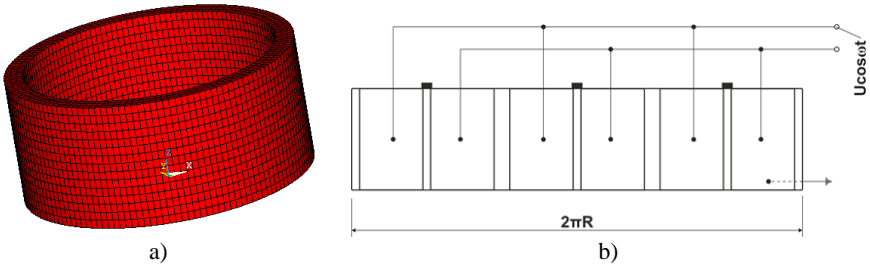


**2.1 pav.** „Išskleistas“ trimatis surinkto aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko vaizdas su pažymėtomis pagrindinėmis dalimis: 1 – korpusas; 2 – atraminiai pagrindo elementai (trys vienetai); 3 – pjezocilindras; 4 – kontaktinių zonų elementai (trys vienetai); 5 – rotorius; 6 – rotoriaus ašelė; 7 – precizinis guolis; 8 – magnetas; 9 – antimagnetinė medžiaga; 10 – inkrementinė skalė

## 2.2. Pjezocilindro skaičiuojamasis modelis

Pjezocilindro deformacija lemia rotoriaus judesio kokybę, todėl, kuriant aukštos skyros sukamąjį staliuką, būtina žinoti pjezocilindro dinaminį atsaką į harmoninį sužadimo signalą. Tam programiniu paketu *ANSYS* buvo atlikta skaitinė analizė. Sukurtas objekto baigtinių elementų modelis parodytas 2.2 pav.

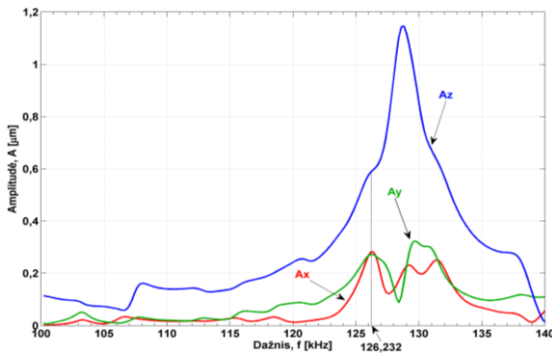
Atliekant pjezocilindro teorinius tyrimus buvo taikytos toliau pateikiamos nekintančios kraštinės sąlygos: 1) trijų zonų, kuriose prie pjezocilindro tvirtinami tolygiai išdėstyti atraminiai pagrindo elementai (žr. 2.1 pav.), poslinkiai yra lygūs nuliui; 2) elektros krūviai, nesusieti su pjezocilindro elektrodais, yra lygūs nuliui. Elektrodų topologija pavaizduota 2.2(b) pav.



**2.2 pav.** Pjezocilindro baigtinių elementų modelis (a) ir išsklotinė su pažymėtais suskirstytais elektrodais ( $R$  – pjezocilindro išorinis spindulys) (b)

### 2.2.1. Rezonansinių dažnių ir virpesių modų įvertinimas

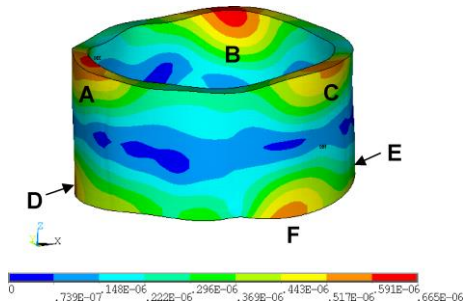
Siekiant nustatyti kuriamo pjezoelektrinio staliuko darbinį dažnių intervalą/-us bei rezonansinius dažnius ir iš jų atrinkti tikslų darbinį dažnį, buvo atlikta pjezocilindro harmoninė analizė 100–140 kHz diapazone. Tam buvo pasirinkta 60 V sužadavimo įtampos (kosinuso formos) amplitudė, kadangi tokia vertė atitinka naudotos pjezokeramikos nominalų veikimo lygį. Gauta amplitudės–dažnio charakteristika pateikta 2.3 pav., kuriame matomi pjezocilindro kontaktinių zonų (t. y. trijų kontaktinių zonų elementų tvirtinimo vietas) centrų poslinkiai  $X$  (tangentine),  $Y$  (radialine) ir  $Z$  (ašine) kryptimi. Virpesiai ašine kryptimi dominuoja visame dažnių intervale, o didžiausia jų amplitudė ( $A_z$ ) stebima esant apie 128,8 kHz. Vis dėlto svarbu paminėti, jog ieškant darbinio rezonansinio dažnio buvo atsižvelgta į tokius aspektus: 1) rotoriaus judesys yra sukuriamas ašinių ir tangentiųjų virpesių, todėl kontaktinių zonų judesio amplitudės šiomis kryptimis turi būti maksimalios; 2) dideli dažninio atsako kreivių pokyčiai dažniausiai atitinka tokias virpesių modas, kurios potencialiai gali būti taikomos rotoriaus judesiui sukurti.



**2.3 pav.** Pjezocilindro amplitudės–dažnio charakteristika su pažymėtais kontaktinių zonų centrų poslinkiais skirtingomis kryptimis

## 2.2.2. Paviršiaus poslinkių įvertinimas

Siekiant nustatyti darbinio rezonansinio dažnio įtaką tiek pjezocilindro paviršiaus suminiam (bendram) poslinkiui, tiek poslinkiams atskiromis kryptimis, buvo atlikta papildoma harmoninė analizė. Nagrinėjamo objekto, sužadinaldo 60 V įtampos 126,23 kHz dažnio signalu, suminis paviršiaus poslinkis parodytas 2.4 pav. Viršutiniame paviršiuje matomos trys beveik vienodos formos maksimalių poslinkių zonos (A–C), ant kurių turėtų būti pritvirtinti kontaktinių zonų elementai (žr. 2.1 pav.). Veikiant sukeltiems stovinčiosios bangos virpesiams, jie turėtų judėti elipsės formos trajektorijomis ir tokiu būdu sukurti rotoriaus judesį. Pjezocilindro vidurinės zonos aukščio atžvilgiu poslinkis yra labai nedidelis, taigi reikšmingos įtakos nedaro. Tiriama kūno apatiniame paviršiuje stebimos didžiausių poslinkių zonos (D–F) yra analogiškos viršutiniame paviršiuje esančioms zonoms formos bei amplitudžių atžvilgiu. Nepaisant to, D–F zonų lokacija šiek tiek skiriasi. Tą lemia objektui taikomos kraštinės sąlygos ir tai, kad dėl tiekiamos sužadinaldo įtampos atsiranda fazių skirtumas tarp jėgos ir atitinkamų sukurtų poslinkių (kai nutolstama nuo pagrindinio rezonansinio dažnio). Nesant šioms sąlygoms, maksimalūs poslinkiai viršutiniame bei apatiniame paviršiuje būtų identiški.



2.4 pav. Pjezocilindro suminis paviršiaus poslinkis (harmoninė analizė), sukeltas virpesių modos esant darbiniam rezonansiniam 126,23 kHz dažniui ( $U = 60$  V)

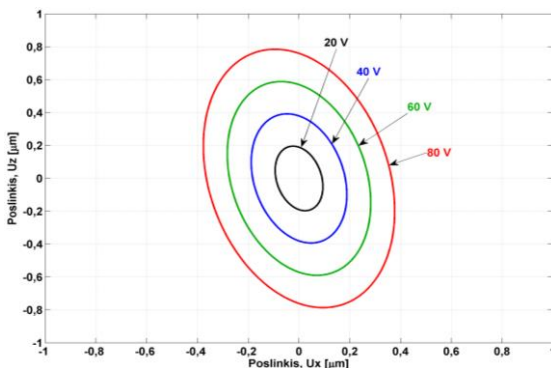
Pjezocilindro paviršiaus poslinkiai tangentine ir radialine kryptimi yra panašūs zonų išsidėstymo, formų ir amplitudžių atžvilgiu. Ašinių poslinkių zonų išsidėstymas, formos bei amplitudės panašios į tas, kurios pavaizduotos 2.4 pav., kadangi virpesių šia kryptimi įtaka suminiam poslinkiui yra didžiausia.

Pjezocilindro paviršiaus poslinkiai tangentine ir radialine kryptimi yra panašūs zonų išsidėstymo, formų ir amplitudžių atžvilgiu. Ašinių poslinkių zonų išsidėstymas, formos bei amplitudės panašios į tas, kurios pavaizduotos 2.4 pav., kadangi virpesių šia kryptimi įtaka suminiam poslinkiui yra didžiausia.

## 2.2.3. Kontaktinių zonų judesio trajektorijų įvertinimas

Elipsės formos judesio trajektorija – gerai žinoma išskirtinė rezonansinių ultragarsinių pjezoelektrinių variklių savybė. Jei elipsė taisyklinga, rotoriaus (sukamųjų staliukų atveju) judesys yra tolygus, kokybiškas. Atsižvelgiant į tai, buvo nuspręsta ištirti pasirinkto pjezocilindro kontaktinių zonų judesio trajektorijas XYZ plokštumose, taikant jau anksčiau naudotą sužadinaldo signalą, tik keičiant įtampos amplitudę nuo 20 V iki 80 V. Kaip minėta anksčiau šiame poskyryje, tangentiniai bei ašiniai virpesiai kuria rotoriaus judesį, taigi šių dedamųjų įtaka yra didžiausia, todėl toliau pateiktame grafike pavaizduotos XZ

plokštumoje formuojamos judesio trajektorijos. Nepriklausomai nuo žadinimo įtampos amplitudės visos gautos trajektorijos apibrėžiamos taisyklingos elipsės formos kreivėmis. Reikia paminėti, jog įtampos amplitudės didėjimas sąlygoja tiesinį poslinkių amplitudžių didėjimą.



2.5 pav. Pjezocilindro kontaktinių zonų judesio trajektorijos XZ plokštumoje ir jų priklausomybė nuo sužadavimo įtampos amplitudės

### 2.3. Matematinis pjezocilindro sąveikos su rotoriumi modelis

Siekiant geriau suprasti, kaip harmoniniu sužadavimo signalu paveiktame pjezocilindre ( $J$ ) sukelti virpesiai kontaktinės zonos elementu perduodami į rotorijų (2), buvo sukurtas sutelktų parametrų penkių laisvės laipsnių matematinis modelis, kuriuo aprašoma sąveika tarp minėtų struktūrinių komponentų (2.6 pav.). Jų atitinkamų taškų koordinatės yra  $A_1(x_1, y_1)$  ir  $A_2(x_2, y_2)$ ; čia  $x_1 = x_2 = x$ , o rotoriaus poslinkis ašine kryptimi sąveikos zonoje išreiškiamas kaip  $v = l - y_2$ .

Tariama, kad dėl sąveikos su kontaktinės zonos elementu rotoriaus taškas  $A_2$  pasislenka tangentine ( $u$ ) ir ašine ( $v$ ) kryptimi. Atitinkamos deformacijos jėgos, veikiančios pjezocilindrą bei rotorijų, pateiktos toliau.

$$P_{y_1} = m_1 \ddot{y}_1 + H_{y_1} \dot{y}_1 + C_1 y_1 - B \cos(\omega t), \quad (1)$$

$$P_{y_2} = H_{y_2} \dot{y}_2 + C_2 (y_2 - l), \quad (2)$$

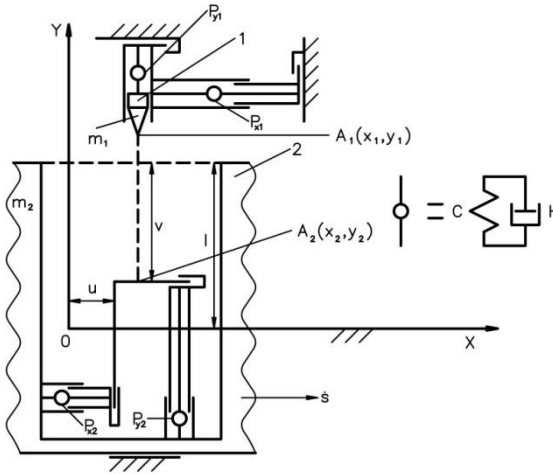
$$P_{x_1} = m_1 \ddot{x}_1 + H_{x_1} \dot{x}_1 + C_{x_1} x_1 - A \sin(\omega t), \quad (3)$$

$$P_{x_2} = P_u = H_u \dot{u} + C_u u, \quad (4)$$

$$P_s = m_2 \ddot{s} + D \dot{s}; \quad (5)$$

čia  $m_1$  – pjezocilindro su kontaktinės zonos elementu masė,  $m_2$  – rotoriaus masė,  $H_{x_1}$  ir  $H_{y_1}$  – pjezocilindro klampiosios trinties koeficientai atitinkamai

tangentine ir ašine kryptimi,  $H_u$  ir  $H_{y_2}$  – rotoriaus klampiosios trinties koeficientai atitinkamai tangentine ir ašine kryptimi,  $C_{x_1}$  ir  $C_1 = C_{y_1}$  – pjezocilindro standumo koeficientai atitinkamai tangentine ir ašine kryptimi,  $C_u$  ir  $C_2 = C_{y_2}$  – rotoriaus standumo koeficientai atitinkamai tangentine ir ašine kryptimi,  $A\sin(\omega t)$  ir  $B\cos(\omega t)$  – išorinės (pjezocilindro sužadavimo) jėgos,  $\dot{s}$  – rotoriaus greitis,  $D\dot{s}$  – rotoriaus judesio pasipriešinimo jėga. Reikia paminėti, jog  $XOY$  koordinatinių sistemoje pjezocilindro su kontaktinės zonos elementu statinės pusiausvyros padėtis ašine kryptimi yra stebima, kai  $y_1 = 0$ , o atitinkama rotoriaus padėtis stebima, kai  $y_2 = l$ .



**2.6 pav.** Sutelktų parametrų modelis, kuriuo aprašoma sąveika tarp pjezocilindro su kontaktinės zonos elementu (1) ir rotoriaus (2)

Pateiktoms diferencialinėms (1–5) lygtims supaprastinti buvo taikomi tokie narių pakeitimai:  $p^2 = \frac{C_1}{m_1}$ ,  $\tau = pt$ ,  $\dot{y}_1 = \frac{dy_1}{dt} = p \frac{dy_1}{d(pt)} = py_1'$ ,  $\ddot{y}_1 = p^2 y_1''$ ,  $\dot{x}_1 = px_1'$ ,  $\ddot{x}_1 = p^2 x_1''$ ,  $h_{y_1} = \frac{Hy_1}{\sqrt{m_1 C_1}}$ ,  $h_{y_2} = \frac{Hy_2}{\sqrt{m_1 C_1}}$ ,  $h_{x_1} = \frac{Hx_1}{\sqrt{m_1 C_1}}$ ,  $h_u = \frac{Hu}{\sqrt{m_1 C_1}}$ ,  $d = \frac{D}{\sqrt{m_1 C_1}}$ ,  $C_{21} = \frac{C_2}{C_1}$ ,  $C_{x_1 1} = \frac{C_{x_1}}{C_1}$ ,  $C_{u1} = \frac{C_u}{C_1}$ ,  $\bar{P} = \frac{P}{C_1}$ ,  $a = \frac{A}{C_1}$ ,  $b = \frac{B}{C_1}$ ,  $\mu = \frac{m_2}{m_1}$ ,  $v = \frac{\omega}{p}$ ,  $T_\tau = \frac{2\pi}{v}$ ; čia  $p$  ir  $\omega$  – atitinkamai tikrinis ir kampinis pjezocilindro dažnis. Šiuo atveju (1–5) lygtys įgauna toki pavidalą:

$$\bar{P}_{y_1} = y_1'' + h_{y_1} y_1' + y_1 - b\cos(v\tau), \quad (6)$$

$$\bar{P}_{y_2} = h_{y_2} y_2' + C_{21}(y_2 - l), \quad (7)$$

$$\bar{P}_{x_1} = x_1'' + h_{x_1} x_1' + C_{x_1 1} x_1 - a\sin(v\tau), \quad (8)$$

$$\bar{P}_u = h_u u' + C_{u1} u, \quad (9)$$

$$\bar{P}_s = \mu s'' + ds'. \quad (10)$$

Toliau pateikiami du galimi analizuojamos sąveikos atvejai.

- Sąveikos nėra ( $y_1 > y_2$ )

Kadangi sąveikos nėra, sistemoje vyrauja jėgų pusiausvyra:  $\bar{P}_{y_1} = 0, \bar{P}_{y_2} = 0, \bar{P}_{x_1} = 0, \bar{P}_u = 0, \bar{P}_s = 0$ .

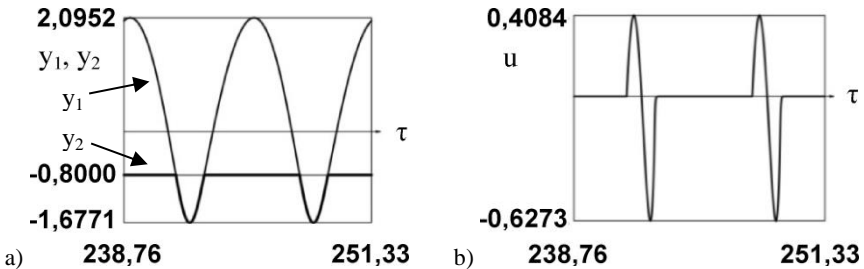
- Sąveika yra ( $y_1 = y_2$ )

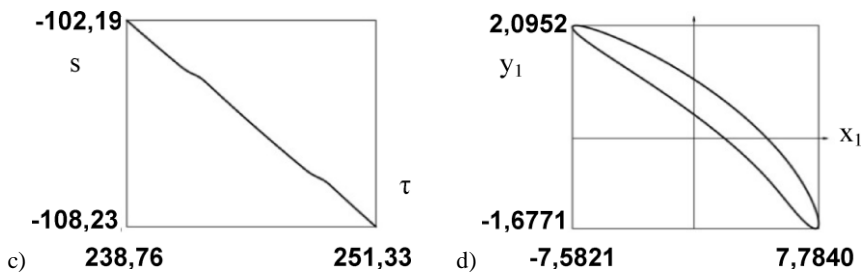
Esant sąveikai, galioja tokios jėgų matematinės išraiškos:  $\bar{P}_{y_1} + \bar{P}_{y_2} = 0, \bar{P}_{x_1} + \bar{F}_f = 0, \bar{P}_u - \bar{F}_f = 0, \bar{P}_s - \bar{P}_u = 0$ ; čia  $\bar{F}_f$  – trinties jėga tarp kontaktinės zonos elemento ir rotoriaus, išreiškiama kaip  $\bar{F}_f = H_0 |\bar{P}_{y_2}| \text{sgn}(x' - (u' + s'))$ . Išsami šios išraiškos forma yra tokia:

$$\bar{F}_f = \begin{cases} +H_0 |\bar{P}_{y_2}|, & \text{kai } (x' - (u' + s')) > 0, \\ (-1, +1) H_0 |\bar{P}_{y_2}|, & \text{kai } (x' - (u' + s')) = 0, \\ -H_0 |\bar{P}_{y_2}|, & \text{kai } (x' - (u' + s')) < 0. \end{cases}$$

Gautos (6–10) lygtys buvo sprendžiamos Niurmako metodu panaudojant *Borland C++ Builder 6* programinę įrangą ir atsižvelgiant į sąveikos atveju pateiktas jėgų matematinės išraiškas. Skaičiavimams buvo pasirinktos tokios nedimensinių parametų vertės, kurios labiausiai atitiktų ir apibūdintų realią sąveikaujančių elementų sistemą:  $h_{y_1} = h_{x_1} = 0,1, h_{y_2} = h_u = 0,1, C_{21} = 4, C_{x_1} = 1, C_{u1} = 4, \mu = 4, d = 0,1, a = b = 1, v = 1; 1,25; 1,43, l = -0,8; 0; 0,8$ .

Tirtos sistemos atsakai buvo gauti esant nusistovėjusiam judesio režimui bei kintančiam pjecocilindro sužadinimo dažniui ( $v$ ) ir rotoriaus atstumui nuo statinės pusiausvyros padėties ašine kryptimi ( $l$ ). Vienas iš labiausiai informatyvių atsakų, suformuotas taikant rezonansinį sužadinimo dažnį ( $v = 1$ ) esant tarpeliui ( $l = -0,8$ ) tarp kontaktinės zonos elemento ir rotoriaus, parodytas 2.7 pav. Siekiant aiškumo, laike kintančiose charakteristikose (2.7(a–c) pav.) pavaizduoti du neigiamo (prieš laikrodžio rodyklę) judesio periodai.





**2.7 pav.** Atsakas, kuriuo apibūdinama sąveika tarp pjezocilindro su kontaktinės zonos elementu ir rotoriaus esant nusistovėjusiam judesio režimui, kai  $v = 1$  ir  $l = -0,8$ : a) dviejų sąveikaujančių taškų padėties ašine kryptimi kintant laikui; b) rotoriaus tangentinis poslinkis kintant laikui; c) rotoriaus suminis kampinis poslinkis kintant laikui; d) kontaktinės zonos elemento judesio trajektorija tangentinėje–ašinėje plokštumoje

Palyginus pavaizduotą atsaką su kitais analizuotais, buvo nustatyta, kad kuriamo aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko pjezocilindro rekomenduotino darbinio dažnio intervalas turėtų apimti tik rezonansinį ir/arba jam gretimus dažnius, o tarp rotoriaus ir kontaktinės zonos elemento ašine kryptimi turėtų egzistuoti tarpelis rotoriumi sukantis.

#### 2.4. Pjezocilindro sąveikos su rotoriumi pereinamųjų procesų analizė

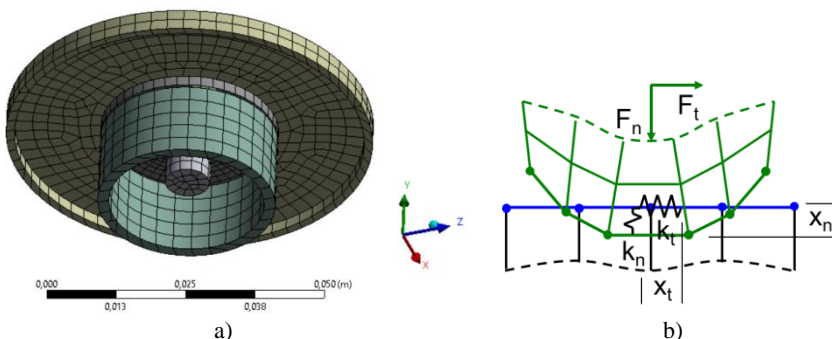
Atlikta pjezocilindro sąveikos su rotoriumi pereinamųjų procesų analizė leido nustatyti rotoriaus atsaką laike, veikiant kintančiai išorinei apkrovai. Skaičiuojamasis sąveikaujančių elementų modelis (2.8(a) pav.) buvo sukurtas panaudojant ANSYS programinę įrangą. Taikytos tokios kraštinės sąlygos: 1) rotorių veikianti gravitacinė jėga – 0,5 N; 2) rotoriaus ašelės judėjimas apribotas guolio tipo įtvirtinimu; 3) trinties koeficientas tarp kontaktinių zonų elementų ir rotoriaus yra –0,5; 4) veikiant išorinei apkrovai (0–2 kg), jos centrinė ašis sutampa su rotoriaus sukimosi ašimi; 5) harmoninis sužadavimo signalas (60 V, 126,23 kHz) naudojamas kontaktinių zonų elementų judesiu sukurti.

Analizuotos pjezocilindro–rotoriaus sistemos kontaktuojančių paviršių vibromūginėi sąveikai sukurti buvo taikytas baudos funkcijos metodas, paremtas menamų itin standžių spyruoklių, įterptų tarp sąveikaujančių elementų, veikimu (2.8(b) pav.). Pateiktame paveiksle pjezocilindro sukelta sąveikos normalinė (ašinė) jėga ( $F_n$ ) bei tangentinė jėga ( $F_t$ ) veikia kontaktinės zonos elementą, spaudžiamą prie rotoriaus. Baudos funkcija yra išreiškiama dviejų sąveikaujančių paviršių pirma potencinės energijos variacija [15]:

$$\delta \Pi = F_n \delta x_n + F_t \delta x_t = k_n x_n \delta x_n + \text{sgn}(x_t) \mu k_n x_n \delta x_t; \quad (11)$$

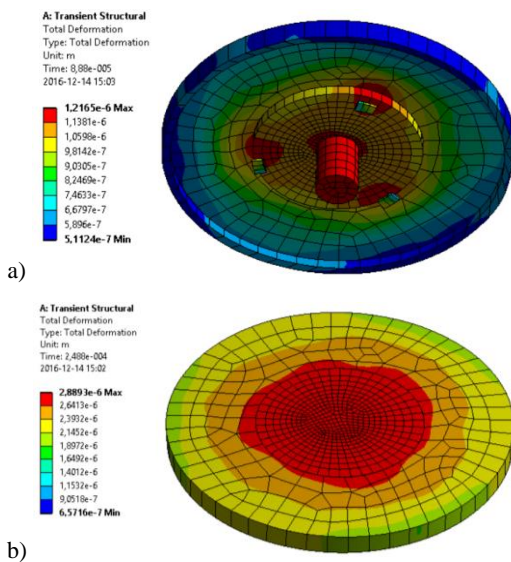
čia  $k_n$  – sąveikos standumas normaline kryptimi,  $x_n$  – poslinkis (skverbtis) normaline kryptimi,  $x_t$  – poslinkis (skverbtis) tangentine kryptimi,  $\mu$  – trinties koeficientas tarp dviejų sąveikaujančių elementų.



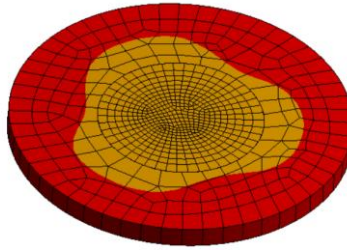


**2.8 pav.** a) Pjezocilindro sąveikos su rotoriumi trimis tolygiai išdėstytais kontaktinių zonų elementais baigtinių elementų modelis; b) baudos funkcijos metodo aiškinamoji schema

Toliau pateikiami analizuojamos sistemos suminio poslinkio vaizdai parodo sistemos atsaką skirtingais laiko momentais po elektrinio sužadinimo pradžios, neveikiant jokiai išorinei apkrovai. Kai laikas lygus 0,09 ms, stebima, kad paveiktos (maksimalus poslinkis siekia  $1,2 \mu\text{m}$ ) yra tiktai zonos, kurios tiesiogiai patiria pjezocilindro sukeltus ir perduotus virpesius. Praėjus 0,25 ms, struktūroje poslinkis pasiskirsto stipriau (maksimali vertė –  $2,9 \mu\text{m}$ ), apimant centrinę rotoriaus dalį. Paskutiniu laiko momentu (2 ms) rotoriaus visa išorinė dalis yra paveikta sklindančių virpesių, o maksimalus poslinkis siekia  $4,6 \mu\text{m}$ .



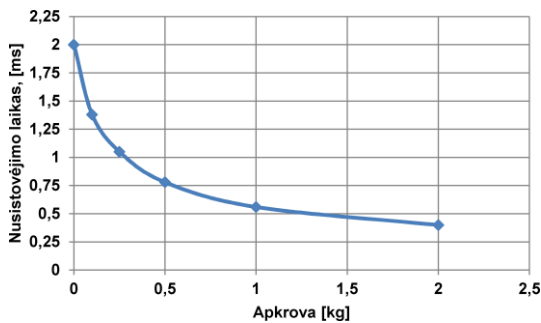
**A: Transient Structural**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: m  
 Time: 2.e-003  
 2016-12-14 15:00  
  
 4,9888e-6 Max  
 4,0796e-6  
 3,5591e-6  
 3,0592e-6  
 2,5493e-6  
 2,0395e-6  
 1,5296e-6  
 1,0197e-6  
 5,0897e-7  
 7,4534e-20 Min



c)

**2.9 pav.** Analizuojamos pjecocilindro–rotoriaus sistemos suminis poslinkis (neveikiant jokiai išorinei apkrovai) po elektrinio sužadavimo pradžios praėjus: a) 0,09 ms; b) 0,25 ms; c) 2 ms

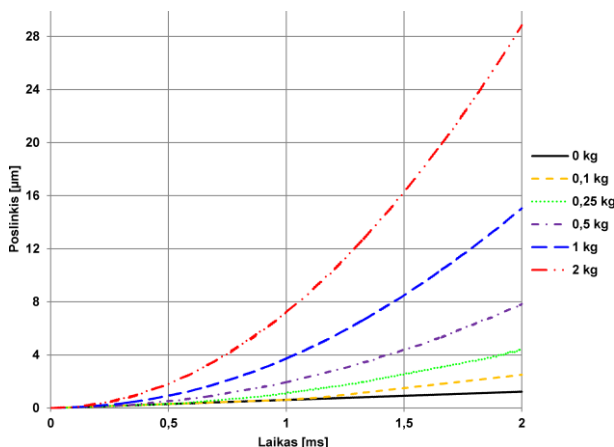
Tiriant pjecocilindro–rotoriaus sistemos laike kintantį (0–2 ms) atsaką didžiausių tangentinį poslinkių atžvilgiu buvo nustatyta, kad neveikiant išorinei apkrovai atsirandantys rotoriaus parazitiniai virpesiai (rotorius virpa vietoje, bet kryptingai nesisuka) trunka visą laikotarpį, t. y. 2 ms. Kai išorinė apkrova yra lygi 2 kg, šie virpesiai išnyksta po 0,4 ms (nusistovėjimo laikas), ir rotorius pradeda kryptingai sukstis. Toliau jo poslinkis netiesiškai didėja iki 2 ms, kai pasiekama maksimali reikšmė (28,85  $\mu\text{m}$ ). Taigi kuo didesnė išorinė apkrova, tuo mažiau laiko reikia rotoriaus parazitiniams virpesiams išnykti bei kryptingam judesui prasidėti (2.10 pav.). Ši netiesinė tendencija gali būti paaiškinama rotoriaus inertiškumo įtaka.



**2.10 pav.** Rotoriaus parazitinių virpesių nusistovėjimo (kryptingo judesio pradžios) laiko priklausomybė nuo išorinės apkrovos

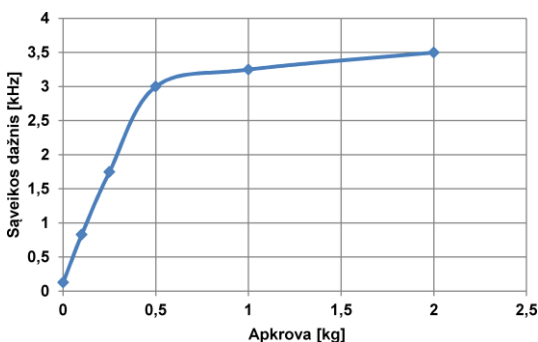
Vieno laisvai pasirinkto taško, esančio rotoriaus išoriniame radialiniame paviršiuje (visi taškai juda vienodai), laike kintantis atsakas – poslinkiai tangentine kryptimi, priklausantys nuo veikiančios išorinės apkrovos, – parodytas 2.11 pav. 0–0,25 kg apkrova sukelia beveik tiesinį poslinkių padidėjimą, bet taikant didesnę apkrovą poslinkiai didėja netiesiškai, kol paskutiniu laiko momentu pasiekiamos maksimalios vertės. Svarbu paminėti, jog

visos gautos kreivės pasižymi vienodu pločiu, nematoma pašalinių virpesių įtaka, o tai parodo kokybišką rotoriaus judesį minėta kryptimi.



**2.11 pav.** Vieno laisvai pasirinkto taško rotoriaus išoriniame radialiniame paviršiuje poslinkiai tangentine kryptimi (priklausantys nuo išorinės apkrovos) po elektrinio sužadavimo pradžios

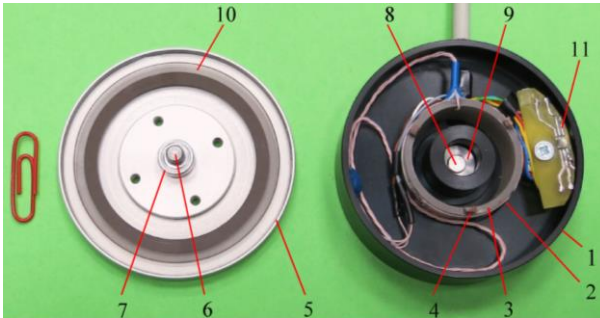
Atlikus identišką taško poslinkių tyrimą ašinės krypties atžvilgiu galima teigti, jog daugeliu atvejų šie poslinkiai yra nereguliarūs, stebima pašalinių virpesių įtaka. Tai gali būti dėl analizuojamos sistemos konstrukcijos netobulumo ir/arba rotoriaus inercijos. Visgi didėjant išorinei apkrovai ašiniai poslinkiai tampa labiau periodiški. Šį efektą sukelia didesnė prispaudimo jėga, lemianti dažnesnę kontaktinių zonų elementų sąveiką su rotoriumi (2.12 pav.).



**2.12 pav.** Kontaktinių zonų elementų sąveikos su rotoriumi ašine kryptimi dažnio priklausomybė nuo išorinės apkrovos

### 3. EKSPERIMENTINIAI AUKŠTOS SKYROS SUKAMOJO STALIUKO TYRIMAI

Tam, kad būtų galima eksperimentiškai patikrinti kuriamo pjezoelektrinio sukamojo staliuko veikimą bei ištirti jo dinamines charakteristikas, buvo pagamintas ir išbandytas šio objekto prototipas (3.1 pav.).



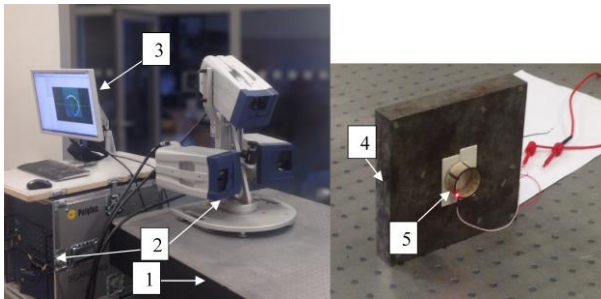
**3.1 pav.** Eksperimentinis aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko prototipas su pažymėtomis pagrindinėmis dalimis: 1 – korpusas; 2 – atraminiai pagrindo elementai (trys vienetai; nematoma šiame vaizde); 3 – pjezocilindras; 4 – kontaktinių zonų elementai (trys vienetai); 5 – rotorius; 6 – rotoriaus ašelė; 7 – precizinis guolis; 8 – magnetas; 9 – antimagnetinė medžiaga; 10 – inkrementinė stiklo–chromo skalė; 11 – optinė galvutė su poslinkio nuskaitymo mikroschema

#### 3.1. Pagrindinės dinaminės charakteristikos

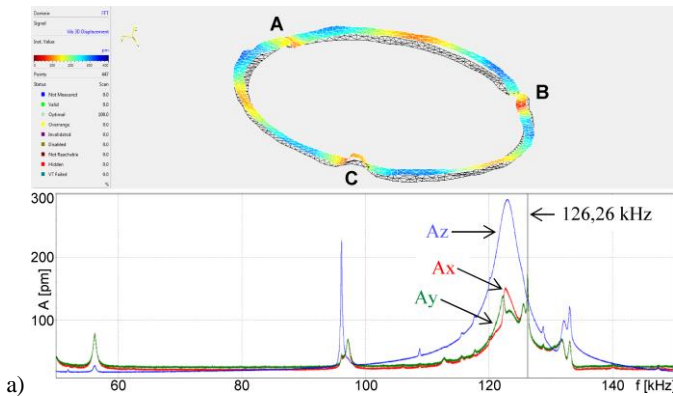
Teorinių tyrimų rezultatams patikrinti pirmiausia buvo atliktas pjezocilindro impedanso matavimas analizatoriumi *Wayne Kerr 6500B*. Gautas dažninio atsako spektras parodė, kad sužadinant pjezocilindro vieną trijų elektrodų grupę (žr. 2.2(b) pav.) (rotoriaus sukuriama judesio kryptis sutampa su laikrodžio sukimosi kryptimi) impedanso ir fazinio kampo kreivės staigiausiai kinta trijuose dažnių intervaluose, iš kurių labiausiai – 124–136 kHz diapazone. Eksperimentą pakartojus, kai sužadinama priešinga trijų elektrodų grupė (sukuriama rotoriaus judesio kryptis yra priešinga laikrodžio sukimosi kryptčiai), beveik analogiško tipo atsako spektras stebimas 125–134 kHz diapazone. Skirtumai tarp atsako kreivių abiem atvejais gali atsirasti dėl kontaktinių porų (tarp rotoriaus ir kontaktinių zonų elementų) tribologinių savybių, pereinamųjų procesų dėl rotoriaus sukimo krypties pakeitimo ir pjezokeramikos nehomogeniškumo. Atsižvelgiant į abiejų spektrų panašumą galima teigti, jog kuriamo pjezostaliuko darbinio dažnio intervalas yra 125–134 kHz.

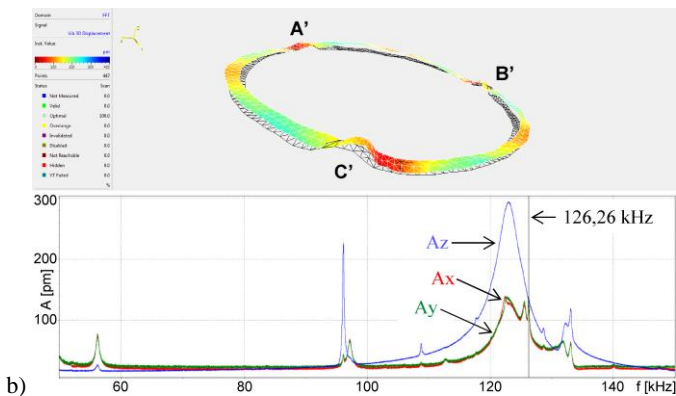
Siekiant išsiaiškinti, ar impedanso matavimo rezultatai teisingi, ir patvirtinti teorinius hamoninės bei modalinės analizės rezultatus, buvo panaudotas trimatės (3D) skenuojančios lazerinės Doplerio vibrometrijos matavimo stendas (3.2 pav.). Atliekant tyrimą pjezocilindro sužadinimo dažnis

kito nuo 50 kHz iki 150 kHz. Kaip rodo amplitudės–dažnio charakteristika (norint sukurti rotoriaus judesį pagal laikrodžio rodyklę), stebimi septyni rezonansiniai dažniai (žr. 3.3(a) pav. apatinę dalį). Remiantis 2.2.1 poskyryje pateiktais aspektais, šiuo atveju buvo pasirinktas 126,26 kHz darbinis rezonansinis dažnis. Pradiniu laiko momentu užfiksuotas pjecocilindro viršutinio paviršiaus poslinkis nepaveikto paviršiaus atžvilgiu (juodas tinklelis), esant pasirinktai virpesių modai, parodytas 3.3(a) pav. viršutinėje dalyje. A–C zonų, kurios atitinka kontaktinių zonų elementų pozicijas, poslinkiai yra didžiausi. Amplitudės–dažnio charakteristika, gauta norint sukurti rotoriaus judesį prieš laikrodžio rodyklę, pavaizduota 3.3(b) pav. Pasirinktas darbinis rezonansinis dažnis (taip pat 126,26 kHz) lemia beveik identišką pjecocilindro viršutinio paviršiaus poslinkį ir A–C zonų išsidėstymą.



**3.2 pav.** Eksperimentinė įranga pjecocilindro darbiniam rezonansiniam dažniui ir virpesių modai nustatyti: 1 – optinis stalas (1HT15-20-20, *Standa*); 2 – trimitės (3D) skenuojančios lazerinės Doplerio vibrometrijos sistema (*Polytec PSV-500-3D*); 3 – kompiuteris; 4 – stovas; 5 – pjecocilindras

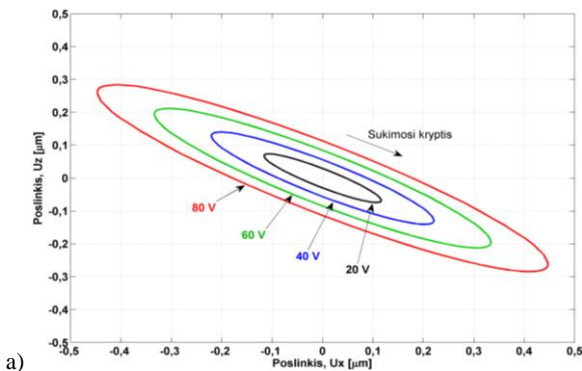


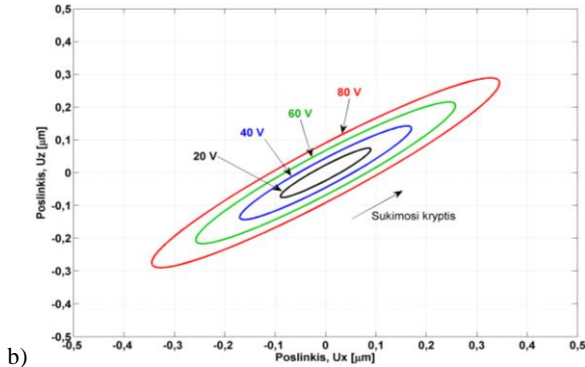


**3.3 pav.** Pjezocilindro amplitudės–dažnio charakteristika ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  – atitinkamai tangentinių, radialinių ir ašinių poslinkių amplitudės), bei viršutinio paviršiaus poslinkis pradiniu laiko momentu, esant pasirinktai tangentinei–ašinei virpesių modai, norint sukurti pjezoelektrinio staliuko rotoriaus judesį pagal (a) ir prieš (b) laikrodžio rodyklę

### 3.2. Kontaktinių zonų elementų judesio trajektorijos

Atitinkamų skaitinių tyrimų (žr. poskyrį 2.2.3) rezultatams patvirtinti buvo ištirtos pjezocilindro kontaktinių zonų elementų judesio trajektorijos visose erdvinėse plokštumose, keičiant sužadinimo įtampos amplitudę (20–80 V). Sužadinimo signalo dažnis buvo lygus 126,26 kHz, norint sukurti pjezoelektrinio staliuko rotoriaus judesį pagal ir prieš laikrodžio rodyklę. Šis tyrimas buvo atliktas taikant prieš tai minėtą trimatės skenuojančios lazerinės Doplerio vibrometrijos matavimo standą. Labiausiai informatyvūs rezultatai – XZ plokštumoje formuojamos judesio trajektorijos – pateikti 3.4 pav. Kaip matoma, visos gautos trajektorijos apibrėžiamos taisyklingos elipsės formos kreivėmis, nepriklausomai nuo sužadinimo įtampos amplitudės; tai leidžia sukurti tolygų rotoriaus judesį abiem kryptimis.





**3.4 pav.** Pjeczocilindro kontaktinių zonų elementų centrų judesio trajektorijos XZ plokštumoje ir jų priklausomybė nuo sužadinimo įtampos amplitudės, norint sukurti pjezoelektrinio staliuko rotoriaus judesį pagal (a) ir prieš (b) laikrodžio rodyklę

Pagrindinis skirtumas tarp visose plokštumose formuojamų judesio trajektorijų yra maksimalių poslinkių amplitudės: tangentinių ir radialinių poslinkių vertės rotoriaus judesio pagal laikrodžio rodyklę atveju vidutiniškai yra atitinkamai 28 % ir 25 % didesnės už vertes priešinga kryptimi. Ašinių poslinkių atžvilgiu galioja atvirkščia tendencija, vidutiniam skirtumui esant 1,6 %.

### 3.3. Pjeczocilindro paviršiaus poslinkio įvertinimas

Analizuojamo pjeczocilindro paviršiaus poslinkiui stebėti ir įvertinti buvo taikytas skaitmeninės holografinės interferometrijos metodas, panaudojant eksperimentinę įrangą *PRISM* (ang. *Precise Real-time Instrument for Surface Measurement*). Kaip parodė viršutinio (varančiojo) ir radialinio išorinio paviršiaus tyrimų rezultatai (interferencinių juostų išsidėstymas), pasirinkta pjeczocilindro elektrodų topologija ir sužadinimo tipas leidžia sukelti tolygius poslinkius, kurie gali sukurti kokybišką kuriamo aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko rotoriaus judesį pagal ir prieš laikrodžio rodyklę.

### 3.4. Skyros matavimas

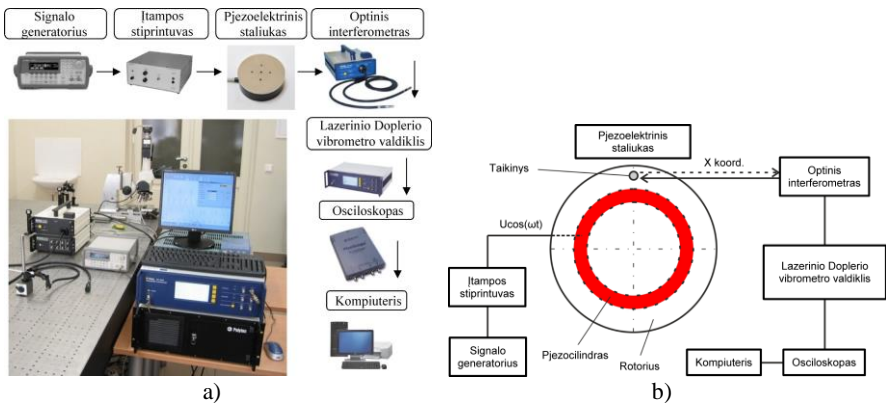
Skyra – tai mažiausias įvesties parametro pokytis, kuris gali būti patikimai nustatytas. Vykdyklio atveju ji apibrėžia mažiausią galimą judesio pokytį, t. y. mikrožingsnį [16–17].

Eksperimentinė įranga, naudota pjezoelektrinio sukamojo staliuko skyrai ir su ja susijusioms charakteristikoms matuoti, pavaizduota 3.5(a) pav., o supaprastinta matavimų stendo struktūrinė schema – 3.5(b) pav. Įrangą sudaro optinis stalas (*IHT15-20-20, Standa*), signalo generatorius (*Agilent 33220A*), įtampos stiprintuvas (*EPA-104*), pjezoelektrinis staliukas, optinis interferometras

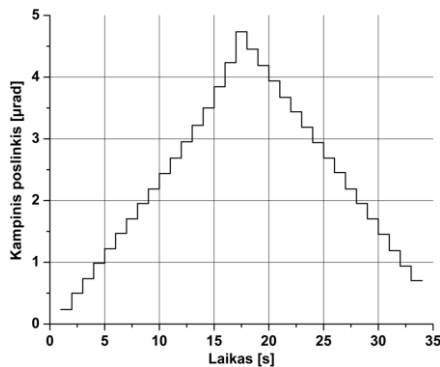
(Polytec OFV-512), lazerinio Doplerio vibrometro valdiklis (Polytec OFV-5000), osciloskopas (PicoScope-3424) ir kompiuteris.

Atliekant tyrimą pjezocilindras buvo sužadinas harmoniniu paketiniu signalu (3 ciklai/s), kurio įtampos amplitudė – 40 V, o dažnis – 126,26 kHz.

Pradinis sistemos atsako signalas buvo filtruotas ir interpoliuotas. Gauta skyros kreivė parodyta 3.6 pav. Laiko intervalas nuo 0 s iki 16 s žymi pjezoelektrinio staliuko rotoriaus judesį laikrodžio rodyklės sukimosi kryptimi, intervalas nuo 19 s iki 34 s – judesį priešinga kryptimi, o 16–19 s intervalas – pereinamuosius procesus, atsirandančius tarp pjezocilindro ir rotoriaus, keičiant sukimosi kryptį. Vidutinė skyra, rotorui sukantis pagal laikrodžio rodyklę, yra 0,250  $\mu$ rad, o judant prieš laikrodžio rodyklę – 0,258  $\mu$ rad, taigi skirtumas tarp šių verčių siekia tik apie 3 %.



3.5 pav. Eksperimentinė įranga (a) ir supaprastinta matavimų stendo struktūrinė schema (b) pjezoelektrinio sukamojo staliuko skyrai ir su ja susijusioms charakteristikoms matuoti



3.6 pav. Pjezoelektrinio sukamojo staliuko skyra, priklausanti nuo laiko ir sukimosi krypties: 0,250  $\mu$ rad pagal laikrodžio rodyklę (0–16 s), 0,258  $\mu$ rad – prieš ją (19–34 s)



Tiriant skyrą, kitas svarbus parametras – rotoriaus išorinė apkrova. Šiuo atveju rezultatai parodė, kad skyros priklausomybė nuo apkrovos (0–2 kg) yra netiesinė, o maksimali skyra stebima esant 0,25 kg. Tolesnis apkrovos didinimas iki didžiausios ribos sąlygoja apie 11 kartų mažesnės skyros atsiradimą.

### 3.5. Sukimo momento charakteristikos

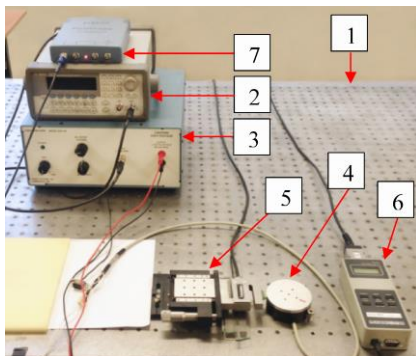
Kuriamo aukštos skyros pjezelektrinio staliuko sukimo momento charakteristikoms nustatyti naudotas matavimo stendas pavaizduotas 3.7 pav. Kaip ir anksčiau, pjezocilindrui sužadinti į jį buvo tiekiamas 126,26 kHz darbinio rezonansinio dažnio signalas, įtampos amplitudę keičiant 20–80 V diapazone.

Matavimų pradžioje buvo atliktas eksperimentas rotoriaus kampiniam greičiui, priklausančiam nuo išorinės apkrovos (0–2 kg), išmatuoti. Buvo nustatyta, jog mažiausia įtampa, reikalinga minimaliam rotoriaus greičiui (28 aps/min) sukurti, siekia 20 V (neveikiant išorinei apkrovai). Didžiausias kampinis greitis, lygus 66 aps/min, pasiektas, kai įtampos amplitudė buvo 80 V, o išorinė apkrova – 0,5 kg, kadangi ji sukuria

sukamajam judesiui reikalingą rotoriaus prispaudimo prie kontaktinių zonų elementų jėgą. Bendra nustatyta tendencija – didėjant sužadavimo įtampos amplitudei rotoriaus kampinis greitis didėja netiesiškai, o didėjimo sparta atvirkščiai priklauso nuo išorinės apkrovos.

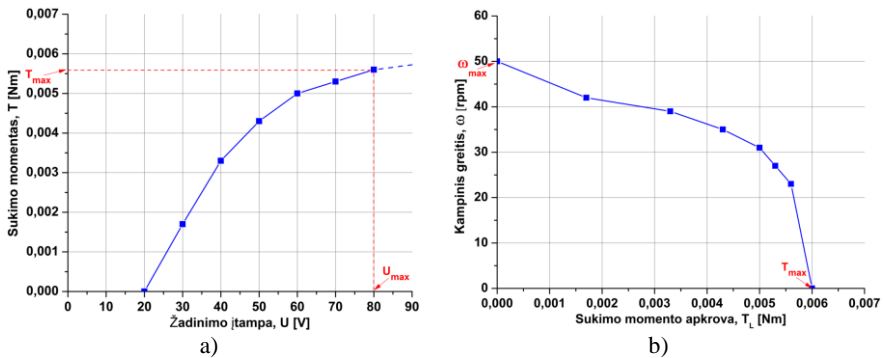
Rotoriaus sukimo momento tyrimai atskleidė, kad didinant sužadavimo įtampos amplitudę sukurtas sukimo momentas didėja (3.8(a) pav.). Beveik tiesinė priklausomybė stebima 20–50 V intervale, kai sukimo momentas kinta nuo 0 Nm iki 0,0043 Nm. Didinat įtampą toliau stebima netiesinė tendencija. Maksimali vertė (0,0056 Nm) pasiekama, kai įtampos amplitudė lygi 80 V.

Rotoriaus kampinio greičio priklausomybės nuo sukurto sukimo momento apkrovos tyrimas (3.8(b) pav.) parodė, jog esant pastoviai sužadavimo įtampos amplitudei (50 V) pasiektas kampinis greitis mažėja beveik tiesiškai nuo didžiausio (50 aps/min) greičio (apkrova netaikoma) iki 31 aps/min (0,005 Nm).



**3.7 pav.** Matavimo stendas aukštos skyros pjezelektrinio staliuko sukimo momento charakteristikoms nustatyti: 1 – optinis stalas (*IHT15-20-20, Standa*); 2 – signalo generatorius (*Agilent 33220A*); 3 – įtampos stiprintuvas (*EPA-104*); 4 – pjezelektrinis staliukas; 5 – tempimo/suspaudimo jėgos jutiklis (*SS50*); 6 – jėgos matavimo prietaisas (*MARK-10, BGI series*); 7 – osciloskopas (*PicoScope-3424*), sujungtas su kompiuteriu (paveiksle nepavaizduotas)

Toliau stebimas staigus kampinio greičio mažėjimas, kol rotorius sustoja, esant didžiausiai (0,006 Nm) sukimo momento apkrovai.



**3.8 pav.** Aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko sukimo momento charakteristikos: a) sukimo momento priklausomybė nuo pjezocilindro sužadinimo įtampos amplitudės; b) kampinio greičio priklausomybė nuo sukurto sukimo momento apkrovos, esant pastoviai pjezocilindro sužadinimo įtampos amplitudei ( $U = 50$  V)

### 3.6. Sukamųjų virpesių, suderintų su sukamuoju judesiu, sukūrimas

Dinaminis pjezoelektrinio staliuko veikimo režimas, paremtas rotoriaus sukamųjų virpesių, suderintų su sukamuoju judesiu, sukūrimu, gali būti taikomas įvairiuose vibraciniuose stenduose optoelektroniniams prietaisams kalibruoti, skystoms cheminėms medžiagoms specialiuose laboratoriniuose induose maišyti ir kitose srityse.

Minėto naujo tipo veikimo režimo realizavimas buvo parodytas šiame darbe, siekiant atskleisti papildomas rezonansinių ultragarsinių sukamųjų staliukų funkcionalumo galimybes. Režimui pademonstruoti buvo pasirinktas papildomas, sąlygiškai supaprastintas, mažesnių matmenų ( $\varnothing 66$  mm  $\times$  15 mm) staliukas, kurio veikimo principas – toks kaip pagrindinio disertacijoje tiriamo objekto, tik pjezoelemento sužadinimo signalo dažnis yra mažesnis (44–46 kHz).

Kombinuotas rotoriaus judesys atsiranda tuo pačiu metu į pjezoelementą tiekiant du skirtingų amplitudžių ir dažnių harmoninius sužadinimo signalus, kai suformuojamas tiek stovinčiosios bangos virpesių kuriamas kryptingas rotoriaus judesys (pagal arba prieš laikrodžio rodyklę), tiek sukamųjų virpesių kuriamas „skenuojamojo“ tipo rotoriaus judesys. Kampinis greitis gali būti keičiamas atitinkamai koreguojant sužadinimo signalų įtampų amplitudes, o kampinio poslinkio amplitudės – koreguojant sužadinimo signalų dažnių skirtumą.

## 4. INKREMENTINIŲ POLIMERINIŲ SUKAMŪJŲ SKALIŲ GAMYBA

Apskritimo formos gardelės tipo inkrementinės skalės – vienas iš pagrindinių optinio sukamojo enkoderio elementų. Kadangi šios skalės būtinos

pjezelektrinių sukamųjų staliukų kampiniam poslinkiui matuoti, jos turi būti ne tik kokybiškos bei patikimos, tačiau ir pasižymėti konkurencingu kainos–efektyvumo santykiu. Siekiant pakeisti įprastai naudojamas neekonomiškas inkrementines stiklo–chromo skales, šiame darbe buvo pasiūlytos inkrementinės polimerinės sukamosios skalės, kaip vienas iš galimų variantų.

Buvo nuspręsta pagaminti dvi identiškias skales ant atskirų  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  kvadrato formos PET padėklų (pagrindų). Buvo numatyta, kad skalių diametras bus 20 mm, išorinis rastrų zonos diametras – 19 mm, vidinis – 17 mm, o vieno rastro plotis – 10  $\mu\text{m}$ . Pasirinktas padėklų storis – 200  $\mu\text{m}$ . Minėti matmenys užtikrina skalių kompaktiškumą bei mechaninį stabilumą.

#### 4.1. Gamybos technologija

Skalių gamybos procesas buvo išskirtas į dvi dalis: I) silicio šablono suformavimas taikant optinę mikrolitografiją ir reaktyvųjį joninį ėsdinimą; II) gardelės tipo skalės suformavimas polimeriniame padėkle taikant UV-nanoįspaudimo technologiją.

Si šablono suformuoti panaudotas monokristalinis  $\langle 100 \rangle$  kristalinės gardelės orientacijos  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  kvadrato formos 500  $\mu\text{m}$  storio padėklas. Gamybos etapai buvo tokie: 1) padėklo nuvalymas cheminiu (acetonas) ir plazminiu ( $\text{O}_2$ ) būdu; 2) paviršiaus padengimas aukojamuoju aliuminio sluoksniu (100 nm) vakuuminio garinimo būdu; 3) paviršiaus padengimas teigiamojo fotorezisto sluoksniu (apie 2,5  $\mu\text{m}$ ); 4) fotorezisto sukepinimas infraraudonųjų spindulių krosnyje; 5) fotokaukės sutapdinimas su Si padėklu ir apšvietimas UV spinduliais iš viršaus; 6) fotorezisto išryškinimas cheminiu būdu; 7) padėklo sukepinimas infraraudonųjų spindulių krosnyje; 8) aukojamąjo (Al) sluoksnio pašalinimas  $\text{Cr}_2\text{O}_3:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}$  tirpale; 9) likusio fotorezisto pašalinimas cheminiu būdu; 10) silicio ėsdinimas reaktyviojo joninio ėsdinimo būdu, suformuojant gardelinę struktūrą; 11) likusio Al sluoksnio pašalinimas  $\text{Cr}_2\text{O}_3:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}$  tirpale.

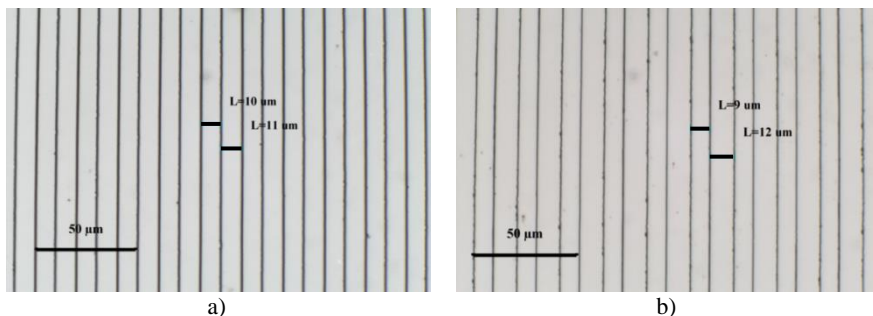
Gardelės tipo skalių suformavimo etapai buvo tokie: 1) PET padėklų nuvalymas plazminiu ( $\text{O}_2$ ) būdu; 2) paviršiaus padengimas 3  $\mu\text{m}$  skysto akrilinio fotopolimero sluoksniu; 3) Si šablono įspaudimas į padėklą ir jo apšvietimas UV spinduliais iš apačios (polimerizacija); 4) Si šablono atskyrimas nuo skalės.

#### 4.2. Pagamintų polimerinių skalių tyrimas

Tam, kad būtų galima įvertinti pagamintų skalių kokybę, pirmiausia panaudotas optinis mikroskopas *Optika B-600MET* su  $2560 \times 1920$  taškų (5 megapikselių) kamera *Optikam Pro 5LT*.

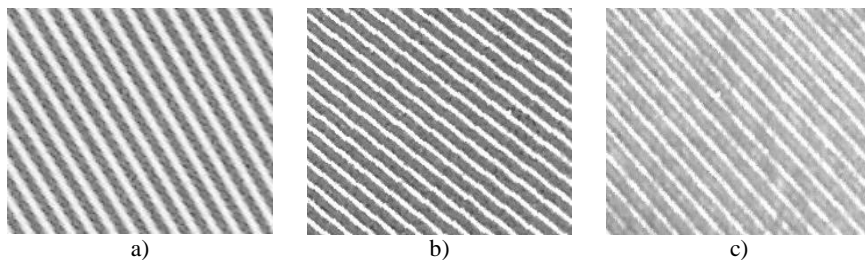
4.1 pav. pateikti laisvai pasirinkti abiejų skalių rastrų zonų fragmentai. Kaip matoma, periodinių mikrostruktūrų kraštai ploni, tiesūs ir gana vienodi. Abiejų skalių gardelių periodai siekia 21  $\mu\text{m}$ . Pirmosios skalės atveju rastro plotis yra apie 11  $\mu\text{m}$ , o tarpas – apie 10  $\mu\text{m}$ . Atitinkamos antrosios skalės vertės

yra 12  $\mu\text{m}$  ir 9  $\mu\text{m}$ . Tikėtina, jog tiek šių skirtumų, tiek keletu matomų paviršiaus mikronelygumų atsiradimą gali lemti naudoto Si šablono paviršiaus nelygumai, dulkės, atsiradusios ant fotopolimero paviršiaus gamybos metu, bei taikytos UV-nanoįspaudimo įrangos ribotos techninės galimybės.



**4.1 pav.** Pagamintos pirmos (a) ir antros (b) inkrementinės polimerinės sukamosios skalės rastrų zonos fragmentas (periodas – 21  $\mu\text{m}$ ; optinis didinimas – 750x)

Palyginamasis gamybos metu naudotos stiklo–chromo fotokaukės, suformuoto Si šablono ir pagamintos polimerinės skalės vaizdas rastrų zonos fragmento atžvilgiu parodytas 4.2 pav. Nors suformuotų rastrų kraštinės tampa ne tokios tolygios lyginant polimerinę skalę su fotokauke, tačiau galima teigti, jog gautos skalės yra pakankamai kokybiškos.



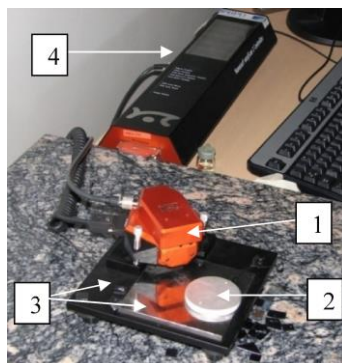
**4.2 pav.** Stiklo–chromo fotokaukės (a), suformuoto Si šablono (b) ir pagamintos polimerinės skalės (c) rastrų zonos fragmento vaizdas

Si šablono ir polimerinių skalių paviršiaus morfologija buvo tirta atominių jėgų mikroskopu (AJM) *Nanosurf easyScan 2* (4.3 pav.). Matavimai buvo atlikti taikant statinį veikimo režimą, skenavimo skyras esant  $256 \times 256$  taškų, valdiklio nustatytai pastoviai jėgai esant 10 nN ir naudojant gembę *ContAl-G*.

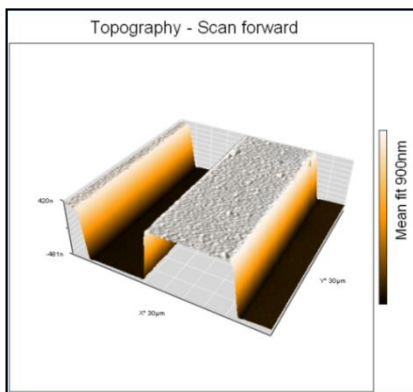
Polimerinės skalės rastrų zonos fragmento ( $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ) vienas periodas (21,8  $\mu\text{m}$ ) pavaizduotas 4.4 pav. Šiuo atveju atstumas tarp rastrų įdubos apačioje yra 9,2  $\mu\text{m}$ , viršuje – 10,6  $\mu\text{m}$ , rastro plotis apačioje – 14  $\mu\text{m}$ , viršuje (keteroje) – 12,6  $\mu\text{m}$ . Verta paminėti, kad rezultatai buvo gauti matavimus atliekant prie

skalės rastrų zonos vidinio krašto diametro atžvilgiu, todėl rastro plotis yra didesnis nei atstumas tarp rastrų. UV-nanoįspaudimas nesukėlė problemų, susijusių su Si šablono užterštumu ir/ar pripilimu prie polimero.

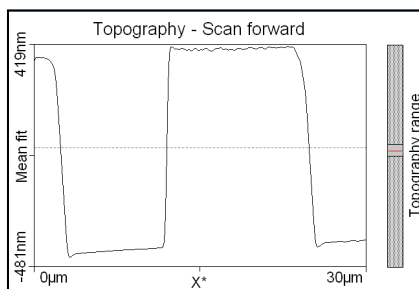
Pagamintos skalės atkartojamumas Si šablono atžvilgiu buvo papildomai įvertintas tiriant rastrų ir įdubų tarp jų paviršiaus morfologiją. Tam pasirinkti minėti elementai atitinkantys  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  ploteliai. AJM gauti rezultatai parodė, kad Si šablono ketera itin gerai atitinka skalės rastrų zonoje esančią įdubą. Ta pati tendencija pastebėta analizuojant ir priešingus paviršius. Tą patvirtina ir pagrindinių paviršiaus šiurkštumo parametrų, užregistruotų aštuoniuose skirtinguose Si ir polimerinės skalės ploteliuose, vidutinės vertės (žr. 4.1 lentelę).



**4.3 pav.** Atominių jėgų mikroskopas *Nanosurf easyScan 2*: 1 – skeneris su vaizdo kamera; 2 – bandinio laikiklis; 3 – bandinio stalielis; 4 – valdiklis



a)



b)

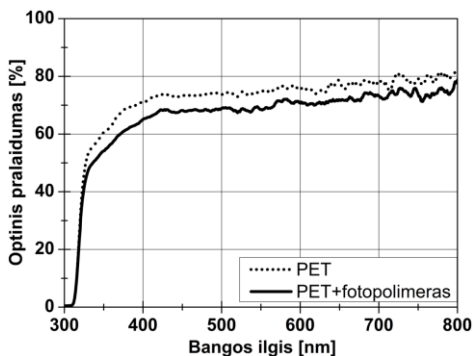
**4.4 pav.** Atominių jėgų mikroskopu gautas pagamintos polimerinės skalės rastrų zonos fragmento ( $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ) vaizdas: a) trimatė topografija; b) profilograma

**4.1 lentelė.** Si šablono ir polimerinės skalės rastrų zonos paviršiaus šiurkštumo parametrai

	Si šablonas		Polimerinė skalė	
	Ketera	Įduba	Ketera	Įduba
$R_a$ , nm	2,76	4,67	3,25	2,83
$R_q$ , nm	4,01	5,36	3,91	3,61
Z, nm	31,7	44,1	33,2	24,0

Optinės inkrementinių sukamųjų skalių savybės turi didelę įtaką nustatant kampinį poslinkį preciziniuose enkoderiuose bei pozicionavimo sistemose. Ypač aktualios – optinio pralaidumo ir atspindžio charakteristikos. Kadangi jos tarpusavyje susijusios, tyrimui atlikti pasirinkta pralaidumo savybė.

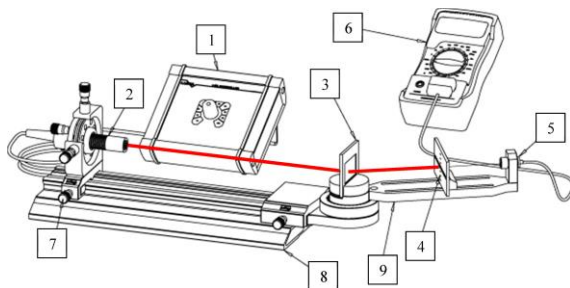
Pagamintos polimerinės skalės buvo analizuotos ultravioletinės–regimosios šviesos (angl. *UV-Vis*) diapazone spektrometru *AvaSpec-2048*, kurio skyra – 1,4 nm. Gautas PET padėklo ir PET padėklo, padengto fotopolimero sluoksniu, atsakas pavaizduotas 4.5 pav. Nustatyta, kad fotopolimero įtaka PET optiniam pralaidumui yra sąlygiškai nedidelė – pagamintų skalių pralaidumas yra sumažėjęs, tačiau pastovus, o skirtumas su nepadengtu PET padėklu neviršija 5–6 % beveik visame tirtos šviesos diapazone.



**4.5 pav.** Fotopolimero sluoksniu įtaka PET padėklo optiniam pralaidumui ultravioletinės–regimosios šviesos diapazone

Kita svarbi optinė savybė, atsižvelgiant į minėtą inkrementinių sukamųjų skalių taikymą, – difrakcijos intensyvumas, kadangi interferenciniuose optiniuose enkoderiuose įprastai taikomi difrakcijos maksimumai (dažniausiai nulinės ir pirmos eilės), sąlygojantys didžiausią intensyvumą.

Eksperimentinės įrangos, naudotos polimerinių skalių difrakcijos intensyvumui išmatuoti, schema parodyta 4.6 pav.; joje esminis struktūrinis komponentas yra helio–neono ( $\lambda = 632,8$  nm) lazeris.



**4.6 pav.** Eksperimentinės įrangos polimerinių skalių difrakcijos intensyvumui išmatuoti schema: 1 – maitinimo šaltinis; 2 – He–Ne lazeris; 3 – polimerinė gardelės tipo skalė; 4 – optinis ekranas; 5 – fotodetektorius; 6 – skaitmeninis multimetras; 7 – lazerio pozicijos nustatymo elementas; 8 – lazerio pozicijos bėgių profilis; 9 – sukamasis profilis [18]

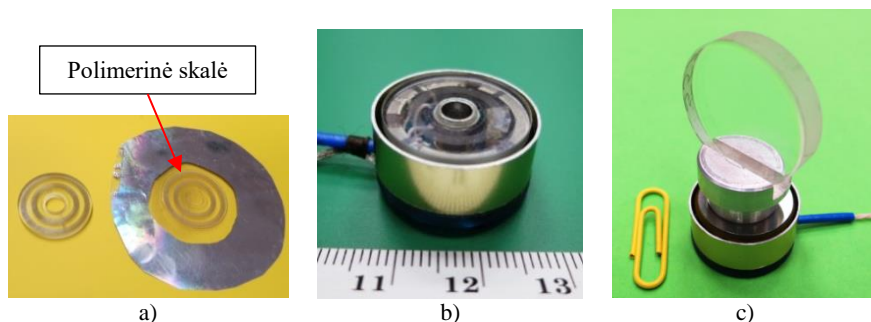
Kiekvienos skalės atveju intensyvumo matavimai buvo atlikti septyniuose skirtinguose tolygiai rastrų zonos atžvilgiu išdėstytose vietose. Kaip pavyzdys, 4.7 pav. pateiktas skalės sukurtas difrakcijos intensyvumo vaizdas, stebimas optiniame ekrane. Šviesių taškų serija indikuoja difrakcijos maksimumų eiles. Kaip matoma, užfiksuotas nulinės bei pirmos eilės intensyvumas yra didžiausias.



**4.7 pav.** Polimerinės gardelės tipo skalės difrakcijos intensyvumo vaizdas optiniame ekrane skalę apšviečiant He–Ne lazerio spinduliu

Suvidurkinti analizuotų skalių matavimų rezultatai atskleidė ir patvirtino, jog 0 ir  $\pm 1$  difrakcijos maksimumų eilės intensyvumas yra didžiausias. Taip pat paaiškėjo, kad intensyvumo vertės, užregistruotos septyniuose kiekvienos skalės vietose, nesiskiria daugiau nei 7 % ir 11 % nuo vidutinių verčių atitinkamai nulinės ir pirmos maksimumų eilės atžvilgiu. Skirtumai tarp abiejų skalių vidutinių intensyvumo verčių neviršija 5 %.

Tinkamas pagamintų polimerinių skalių modifikavimas (pvz., metalizavimas) leistų jas naudoti optinio atspindžio veikimu paremtuose enkoderiuose bei pozicionavimo sistemose. Siekiant pademonstruoti šią galimybę, vienos iš skalių rastrai buvo padengti aliuminio sluoksniu (80 nm) taikant vakuuminį nusodinimą iš garų fazės. Aliuminis pasižymi lengvumu, plastiškumu, pakankamai aukštu optinio atspindžio koeficientu (apie 88–92 % regimosios šviesos diapazone) bei ekonomiškumu. Paruošta skalė ir jos potencialus pritaikymas pavaizduotas 4.8 pav.



**4.8 pav.** Inkrementinės polimerinės sukamosios skalės, kurios rastrai padengti 80 nm Al sluoksniu (a), pritaikymas 22 mm skersmens pjezoelektriniame sukamajame staliuke (b), kuris gali būti panaudotas optiniam elementui pozicionuoti (c)



## 5. AUKŠTOS SKYROS PJEZOELEKTRINIO SUKAMOJO STALIUKO PROTOTIPAS

### 5.1. Geometrinis virtualus prototipo modelis

Atlikus išsamius aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko teorinius bei eksperimentinius tyrimus buvo nuspręsta sukurti nagrinėjamo objekto su integruota grįžtamojo ryšio valdymo sistema prototipą, kuris būtų naudojamas pramoninei pjezoelektrinio staliuko versijai pagaminti. Užduotis buvo įgyvendinta bendradarbiaujant su įmone UAB „Precizika Metrology“.

Naudojant *Autodesk 3ds Max* programinį paketą, buvo sukurtas staliuko su programuojamu valdikliu, reikalingu staliuko rotoriaus numatytam tiksliam judesui, greičiui, sukimo momentui ir kitoms dinaminėms charakteristikoms nuolat užtikrinti, geometrinis virtualus prototipo modelis. 5.1 pav. parodyta viena iš staliuko taikymo sričių – optinio elemento pozicionavimas.



**5.1 pav.** Geometrinis virtualus veikiančio aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko su integruota grįžtamojo ryšio valdymo sistema optiniam elementui pozicionuoti prototipo modelis

### 5.2. Pagamintas fizinis prototipas

Kaip buvo minėta anksčiau, judesio valdymo sistema yra būtinas daugelio aukštos skyros pjezoelektrinių sukamųjų staliukų elementas tiksliam rotoriaus judesui užtikrinti. Įprastai pjezoelektrinių variklių veikimo principas lemia tokių trūkumų atsiradimą (nevertinant pirmame skyriuje paminėtų), kaip, tarkim, laike kintančios trinties porų tribologinės savybės, momentinio kampinio greičio netolygumas bei šio greičio priklausomybė nuo rotoriaus sukimosi krypties. Visa tai daro didelę įtaką pjezoelektrinių variklių dinaminėms savybėms.

Atsižvelgiant į minėtus aspektus, buvo nuspręsta kuriamam sukamajam staliukui sukurti integruotą grįžtamojo ryšio valdymo sistemą. Užduotis buvo atlikta bendradarbiaujant su KTU Elektros ir elektronikos fakulteto mokslininkais. Pagamintas fizinis prototipas matomas 5.2 pav. Norimas rotoriaus



kampinis poslinkis nustatomas išoriniu programuojamu įtaisu (kompiuteriu), tačiau autonominį belaidį valdymą numatoma įdiegti artimiausiu metu. Svarbiausios sukurto aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko techninės charakteristikos pateiktos 5.1 lentelėje. Jų atžvilgiu staliukas yra prilyginamas (arba konkurencingesnis) rinkoje esantiems produktams, tačiau ekonomiško požiūriu yra pranašesnis.



**5.2 pav.** Fizinis aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko su integruota grįžtamojo ryšio valdymo sistema prototipas

**5.1 lentelė.** Svarbiausios sukurto aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko techninės charakteristikos

Matmenys	Ø66 mm × 25 mm
Svoris	150 g
Aktyvi ašis	$\theta_z$
Sukimosi diapazonas	$>360^\circ$
Judesio kryptis	Dvikryptis
Skyra	0,254 $\mu$ rad
Jutiklis	Inkrementinis optinis enkoderis
Maksimalus kampinis greitis (be išorinės apkrovos)	60 aps/min (6,28 rad/s)
Sukimo momentas	5,6 mNm
Maksimali leistina išorinė apkrova	2 kg
Variklio tipas	Rezonansinis ultragarsinis
Medžiaga	Anoduotas aliuminis ir nerūdijantis plienas

## IŠVADOS

1. Atlikta išsami literatūros apie esamus tikslus sukamuosius staliukus apžvalga atskleidė, kad potencialas pjezoelektrinius rezonansinius ultragarsinius stovinčiosios bangos variklius taikyti aukštos skyros sukamuosiuose staliukuose yra didžiulis, tačiau jų praktinį naudojimą vis dar riboja trūkumai, susiję su nepakankamai dideliu tikslumu, konstrukcijos sudėtingumu ir

palyginti dideliais gamybos kaštais. Nustatyta, jog inkrementinės polimerinės skalės pasižymi mažesniu kainos–efektyvumo santykiu nei įprastai naudojamos inkrementinės stiklo–chromo skalės ir gali būti taikomos sukamųjų staliukų preciziniams kampiniams poslinkiams matuoti.

2. Atlikti aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko, turinčio rezonansinį ultragarsinį stovinčiosios bangos variklį, teoriniai tyrimai. Nustatyta:
  - i) Darbinio dažnio intervalas yra 125,8–132 kHz, pjezocilindro sužadavimo įtampos amplitudei esant 20–80 V; pjezocilindro kontaktinių zonų elipsės formos judesio trajektorijos, formuojamos ašinėje–tangentinėje plokštumoje, kuria tolygų sukamąjį rotoriaus judesį.
  - ii) Sutelktų parametrų analitinis pjezocilindro vibrosmūginės sąveikos su rotoriumi dinamikos modelis parodė, jog pjezocilindro rekomenduotino darbinio dažnio intervalas turėtų apimti tik rezonansinį ir/arba jam gretimus dažnius, o tarp rotoriaus ir kontaktinės zonos elemento ašine kryptimi turėtų egzistuoti tarpelis rotoriumi sukantis. Sudarytas modelis gali būti lengvai pritaikomas įvairiems sukamiesiems bei tiesiaiegiams trintimi paremtiems pjezoelektriniams varikliams.
  - iii) Skaitinė pjezocilindro sąveikos su rotoriumi pereinamųjų procesų analizė, veikiant kintančiai išorinei apkrovai (0–2 kg), atskleidė, kad laikas, reikalingas rotoriaus kryptingam judesiui prasidėti, atvirkščiai ir netiesiškai priklauso nuo taikomos išorinės apkrovos.
3. Eksperimentinių pjezoelektrinio sukamojo staliuko dinaminė charakteristikų tyrimų rezultatai parodė, kad:
  - i) 126,26 kHz darbinis rezonansinis dažnis sukelia tangentinius ir ašinius pjezocilindro viršutinio paviršiaus poslinkius, kurie sukuria kontaktinių zonų elementų elipsės formos judesio trajektorijas laikrodžio rodyklės sukimosi ir jai priešinga kryptimi. Didžiausios amplitudės yra stebimos tangentine kryptimi, todėl tangentiniai virpesiai dominuoja visame sužadavimo įtampos amplitudžių diapazone (20–80 V).
  - ii) Pjezocilindro paviršiaus poslinkio įvertinimas skaitmeninės holografinės interferometrijos metodu patvirtina pasirinktos pjezocilindro elektrodo topologijos ir sužadavimo tipo tinkamumą sukelti tolygų viršutinio ir šoninio paviršiaus poslinkį.
  - iii) Vidutinė pjezoelektrinio staliuko skyra yra 0,250  $\mu$ rad, rotoriumi sukantis pagal laikrodžio rodyklę, ir 0,258  $\mu$ rad judant priešinga kryptimi. Tai parodo, kad prietaisas yra pranašesnis už daugelį rinkoje esančių produktų. Skyros priklausomybė nuo apkrovos (0–2 kg) yra netiesinė, o maksimali skyra stebima esant 0,25 kg. Tolesnis apkrovos didinimas iki didžiausios ribos sąlygoja apie 11 kartų mažesnės skyros atsiradimą.
  - iv) Didėjant pjezocilindro sužadavimo įtampos amplitudei (20–80 V) rotoriaus kampinis greitis didėja netiesiškai (28–66 aps/min), o didėjimo sparta atvirkščiai priklauso nuo išorinės apkrovos (0–2 kg). Didinant

sužadavimo įtampos amplitudę sukurtas sukimo momentas didėja netiesiškai. Esant pastoviai sužadavimo įtampei ir didėjant sukimo momento apkrovai kampinis greitis mažėja netiesiškai.

- v) Nustatytas kombinuoto tipo dinaminis pjezoelektrinio staliuko veikimo režimas, paremtas rotoriaus sukamųjų virpesių, suderintų su jo sukamoju judesiu, sukūrimu; originalus režimas lemia lėtą dvikryptį sukamojo–„skenuojamojo“ tipo rotoriaus judesį, kuris gali būti pritaikomas tikslaus pozicionavimo sistemose.
4. Pjezoelektrinio sukamojo staliuko rotoriaus kampiniam poslinkiui galima nustatyti pagamintos dvi inkrementinės polimerinės (PET pagrindo) sukamosios skalės, taikant kombinuotą optinės mikrolitografijos ir UV-nanoįspaudimo technologiją. Skalių paviršiaus šiurkštumas rastrų zonoje yra adekvatus Si šablono paviršiaus šiurkštumui. Skalių optinis pralaidumas, lyginant su fotopolimeru nepadengtu PET padėklu, yra sumažėjęs, tačiau pastovus, o skirtumas neviršija 5–6 % beveik visame tirtame 300–800 nm šviesos bangos ilgio diapazone. Skalių 0 ir  $\pm 1$  difrakcijos maksimumų eilės intensyvumas yra didžiausias, o skirtumai tarp abiejų skalių vidutinių intensyvumo verčių neviršija 5 %.
5. Sukurtas geometrinis virtualus aukštos skyros pjezoelektrinio sukamojo staliuko su integruota grįžtamojo ryšio valdymo sistema modelis bei gana supaprastintas jo fizinis atitikmuo. Svarbiausių techninių charakteristikų atžvilgiu sukurtas pjezoelektrinis staliukas yra prilyginamas (arba konkurencingesnis) rinkoje esantiems produktams, tačiau ekonomiško požiūriu yra pranašesnis. Pristatyta pjezoelektrinio staliuko konstrukcija yra naudojama pramoninei produkto versijai pagaminti (technologijos perkėlimo į pramonę stadija) įmonėje UAB „Precizika Metrology“.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. BAURIENĖ, G., KULVIETIS, G., GRIGORAVIČIUS, A. Optimization of fixation elements parameters for ring type piezoelectric actuator generating elliptical movement. *Mechanics*. 2014, 20(3), 294-298. doi: 10.5755/j01.mech.20.3.7388
2. LU, X., HU, J., YANG, L., ZHAO, C. A novel dual stator-ring rotary ultrasonic motor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013, 189, 504-511. doi: 10.1016/j.sna.2012.11.009
3. YANG, X., LIU, Y., CHEN, W., LIU, J. A cylindrical traveling wave ultrasonic motor using bonded-type composite beam. *Ultrasonics*. 2016, 65, 277-281. doi: 10.1016/j.ultras.2015.09.014
4. LIU, Y., CHEN, W., FENG, P., LIU, J. A square-type rotary ultrasonic motor with four driving feet. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2012, 180, 113-19. doi: 10.1016/j.sna.2012.04.024

5. SMITH, G.L., RUDY, R.Q., POLCAWICH, R.G., DEVOE, D.L. Integrated thin-film piezoelectric traveling wave ultrasonic motors. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2012, 188, 305-311. doi: 10.1016/j.sna.2011.12.029
6. LAN, C-C., WANG, J-H., FAN, C-H. Optimal design of rotary manipulators using shape memory alloy wire actuated flexures. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2009, 153(2), 258-266. doi: 10.1016/j.sna.2009.05.019
7. ZHENG, J., SALTON, A., FU, M. Design and control of a rotary dual-stage actuator positioning system. *Mechatronics*. 2011, 21(6), 1003-1012. doi: 10.1016/j.mechatronics.2011.03.011
8. ZHAO, C. *Ultrasonic motors: technologies and applications*. Beijing: Science Press, 2015.
9. RU, C., LIU, X., SUN, Y. *Nanopositioning technologies – fundamentals and applications*. Switzerland: Springer, 2016.
10. PENG, Y., PENG, Y., GU, X., WANG, J., YU, H. A review of long range piezoelectric motors using frequency leveraged method. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015, 235(1), 240-255. doi: 10.1016/j.sna.2015.10.015
11. ZHANG, M. Z., AN, Q., LI, W. J., ZHANG, J. W. Piezoelectric friction-inertia actuator – a critical review and future perspective. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. 2012, 62, 669-685. doi: 10.1007/s00170-011-3827-z
12. SPANNER, K., KOC, B. Piezoelectric motors, an overview. *Actuators*. 2016, 5(1):6, 3-18. doi: 10.3390/act5010006
13. UCHINO K. Piezoelectric ultrasonic motors: overview. *Smart Materials and Structures*. 1998, 7, 273-285. doi: 10.1088/0964-1726/7/3/002
14. CRAIG, K. *Optical encoders. Lecture notes* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 12 12]. Prieiga per: [http://engineering.nyu.edu/mechatronics/Control\\_Lab/Craig/Craig\\_RPI/Se\\_nActinMecha/S&A\\_Optical\\_Encoders.pdf](http://engineering.nyu.edu/mechatronics/Control_Lab/Craig/Craig_RPI/Se_nActinMecha/S&A_Optical_Encoders.pdf)
15. STEFANCU, A., MELENCIUC, S., BUDESCU, M. Penalty based algorithms for frictional contact problems. *The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy – Construction. Architecture Section*. 2011, 61(3), 119-129.
16. BISHOP, H. R. *The Mechatronics Handbook*. USA: CRC Press, 2002.
17. BAGAD, S. V. *Mechatronics*. India: Technical Publications Pune, 2008.
18. LEYBOLD | *P5834 diffraction gratings*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 11 20]. Prieiga per: <http://photonics.ld-didactic.de/Educational%20Kits/P5834.html>

## AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

### *Straipsniai Web of Science leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą*

1. Bansevicius, Ramutis Petras; Bubulis, Algimantas; Grybas, Ignas; Jūrėnas, Vytautas; Kulvietis, Genadijus. Development of two modifications of piezoelectric high resolution rotary table // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Kaunas: Vibroengineering. ISSN 1392-8716. 2013, Vol. 15, no. 4, p. 2124-2129. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Academic Search Complete; Central & Eastern European Academic Source (CEEAS); Computers & Applied Sciences Complete; Current Abstracts; TOC Premier]. [IF: 0,660; AIF: 2,255; IF/AIF: 0,293; Q3; 2013 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)].
2. Jucius, Dalius; Grybas, Ignas; Grigaliūnas, Viktoras; Mikolajūnas, Marius; Lazauskas, Algirdas. UV imprint fabrication of polymeric scales for optical rotary encoders // Optics and laser technology. Oxford: Elsevier. ISSN 0030-3992. 2014, vol. 56, p. 107-113. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [IF: 1,647; AIF: 2,732; IF/AIF: 0,603; Q2; 2014 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)].
3. Grybas, Ignas; Bubulis, Algimantas; Bansevicius, Ramutis Petras; Jūrėnas, Vytautas. Research of rotary piezotable driven by two harmonic signals // Mechanika / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslų akademija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1207. 2014, Vol. 20, no. 6, p. 573-576. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Compendex; Academic Search Complete; FLUIDEX; Scopus]. [IF: 0,292; AIF: 1,862; IF/AIF: 0,157; Q4; 2014 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)].
4. Grybas, Ignas; Bansevicius, Ramutis Petras; Jūrėnas, Vytautas; Bubulis, Algimantas; Janutėnaitė, Jūratė; Kulvietis, Genadijus. Ultrasonic standing waves-driven high resolution rotary table // Precision engineering. New York, NY: Elsevier. ISSN 0141-6359. 2016, vol. 45, p. 396-402. [Science Citation Index Expanded; Academic Search Alumni Edition; Academic Search Complete; Academic Search Elite; Academic Search Premier; Academic Search Research & Development; Current Contents (Engineering, Computing & Technology); Ingenta Connect; ScienceDirect]. [IF: 1,914; AIF: 2,736; IF/AIF: 0,700; Q1; 2015 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)].

### *Straipsniai kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose*

1. Grybas, Ignas; Bansevicius, Ramutis Petras; Bubulis, Algimantas; Jūrėnas, Vytautas; Janutėnaitė, Jūratė; Kulvietis, Genadijus. R and D of high

resolution rotary table based on the ultrasonic standing waves // Vibroengineering Procedia: international conference Vibroengineering - 2014, Katowice, Poland, 13-15 October, 2014. Kaunas: JVE International. ISSN 2345-0533. 2014, vol. 3, p. 55-58. [Compendex; Academic OneFile].

### ***Lietuvos patentai***

1. Bansevičius, Ramutis Petras; Bubulis, Algimantas; Grybas, Ignas; Jūrėnas, Vytautas; Kasparaitis, Albinas. LT 6129 B. Aukštos skyros pjezoelektrinis kampinio pozicionavimo įrenginys / išradėjai: Ramutis Bansevičius, Algimantas Bubulis, Ignas Grybas, Vytautas Jūrėnas, Albinas Kasparaitis; pareiškėjas: Kauno technologijos universitetas. 2015-03-25. 4 p. [Lietuvos Respublikos patentų duomenų bazė].
2. Bansevičius, Ramutis Petras; Grybas, Ignas; Bubulis, Algimantas; Jūrėnas, Vytautas. LT 6254 B. Sukamojo judesio pjezoelektrinė pavara / išradėjai: Ramutis Bansevičius, Ignas Grybas, Algimantas Bubulis, Vytautas Jūrėnas; pareiškėjas: Kauno technologijos universitetas. 2016-03-10. 4 p. [Lietuvos Respublikos patentų duomenų bazė].

### **INFORMACIJA APIE AUTORIŲ**

Ignas Grybas gimė 1988 m. rugsėjo 22 d. Jonavoje. 2007 m. baigė Jonavos Senamiesčio gimnaziją ir pradėjo studijas Kauno technologijos universitete, Tarptautinių studijų centre, ten 2011 m. įgijo mechanikos inžinerijos bakalauro laipsnį (su pagyrimu). 2013 m. KTU Mechanikos ir mechatronikos fakultete įgijo mechatronikos (specializacija – mikrosistemų inžinerija) magistro laipsnį (su pagyrimu). 2013–2017 m. – KTU Mechatronikos instituto doktorantas. Nuo 2011 m. dirba inžinerinėje–komercinėje srityje, įvairiose pramonės įmonėse.

## RESUME

Conventional (electromagnetic) motors, extensively designed and employed as actuators for high-precision positioning applications, in particular, high-tech products (e.g. mobile medical robots, drugs delivery systems, space satellites, smart photo cameras, hand watches, etc.), can no longer meet the constantly increasing new technical requirements, including (but not limited to) compactness, simple structure, high precision, low manufacturing costs, and others. They also suffer from noise, backlash and drift, run-out errors, slow response, and so on. Therefore, a lot of effort have been put on the worldwide scale into finding alternatives. The motors based on the electrostatic, magnetostrictive, photo-thermal, thermoelectric, shape-memory and other principles are considered to be potential options [8]. However, due to their merits, piezoelectric motors (particularly, resonant ultrasonic) constitute probably the most prominent category. That is mainly governed by the ability of these devices to fulfil most of the aforementioned requirements and offer such properties as fast response, relatively large output torque at low speed, no electromagnetic interference, low noise, etc.

Although resonant ultrasonic standing-wave motors have been widely explored so far as potential drivers for the rotary stages and positioners, they still face issues associated with insufficiently high precision, scalability, structural complexity, wear of contacting surfaces, and relatively high manufacturing costs. Hence, a number of various design and technological methods are applied to solve these problems.

**The aim of this research** is to design, fabricate and characterise high-resolution standing-wave-driven piezoelectric rotary stage with integrated incremental scales.

In order to achieve the aim, the following objectives were raised:

1. To perform a comprehensive literature review of the existing high-precision rotary stages, placing the highest emphasis on the piezoelectric ones, and identify the possibilities of using the incremental scales for achieving high-resolution rotary motion of the stage.
2. To develop analytical and numerical models for the investigation of vibro-impact interaction dynamics and transient responses of piezocylinder and rotor.
3. To experimentally investigate the dynamic characteristics of high-resolution piezoelectric rotary stage and identify their dependence on the driving signal and applied external load.
4. To fabricate and experimentally characterise polymeric incremental scales by using contact-free and contact-based methods for the evaluation of their surface morphology and optical properties.

5. To develop geometric virtual and physical models of the designed high-resolution piezoelectric rotary stage with an integrated closed-loop feedback control system.

## **Research methods**

This work was prepared using theoretical and experimental investigation methods. The theoretical study was carried out by analytical and numerical methods, applying SolidWorks 2016, ANSYS 17.1, Matlab 2016 and Borland C++ Builder 6 software packages. For additional graphical representation, Autodesk 3ds Max software was applied.

The experimental research was executed in the Institute of Mechatronics and the Institute of Materials Science of Kaunas University of Technology.

When performing the experiments, the analyser Wayne Kerr 6500B was used to determine the impedance characteristics of the piezoelement; a 3D scanning laser Doppler vibrometer (LDV) system Polytec PSV-500-3D-HV was employed to measure the displacement of the top surface of the piezocylinder and form motion trajectories of contact zone elements; the surface displacement of the analysed piezocylinder from qualitative point of view was evaluated by using a holographic interferometry-based measurement system PRISM 100 (Hytec); in combination with additional equipment, a single-point LDV system Polytec was utilised to measure all the major dynamic characteristics of the piezoelectric rotary stage; polymeric incremental scales were formed using a vacuum vapour deposition device YBH-71D, optical lithographic equipment, and a reactive ion etching machine PK-2420RIE.

## **Scientific novelty**

The following scientific novelties are presented in the thesis:

1. The topology of electrodes of piezocylinder, which ensures the generation of elliptical motion trajectories of three active contact zone elements of the piezocylinder; the influence of the defined trajectories on dynamic properties of the piezoelectric rotary stage.
2. Lumped-parameter analytical model and distributed-parameter finite element model that take into account the vibro-impact interaction between the piezocylinder and rotor; the finite element model which enables to determine the dependence of rotor response in time on the applied external load.
3. Experimentally investigated dynamic characteristics of high-resolution piezoelectric rotary stage, depending on the driving signal and applied external load.
4. Novel polymeric incremental scales that can be employed instead of conventional glass-chromium incremental scales for ensuring precise angular positioning of piezoelectric stages.



## **Defended statements**

1. The original piezoelectric rotary stage, which is driven by standing-wave vibrations of the piezocylinder, ensures high-resolution bidirectional motion of the rotor.
2. The developed finite element model of the piezocylinder is adequate to the experimental one and enables precise determination of motion trajectories of the contact zone elements.
3. Uniformity of motion of the rotor depends on the excitation frequency of the piezocylinder with respect to resonant frequency and on the air gap between the rotor and the contact zone element of the piezocylinder.
4. The fabricated novel polymeric incremental scales are comparable to conventional glass-chromium incremental scales in terms of surface quality and fidelity of raster pattern and can potentially replace them in cost-sensitive applications, ensuring the required level of precision in angular positioning.

## **Practical value**

The designed, fabricated and characterised piezoelectric rotary stage can be applied for high-resolution angular translation of an object analysed by an optical microscope, positioning of optical elements in scientific/industrial research, dosage of liquid drugs in (bio)medical equipment, and so on. It can also be used as a teaching aid to demonstrate capabilities of mechatronic systems.

The fabricated polymeric incremental scales can be employed in precise rotary encoders and positioning systems instead of conventional glass-chromium incremental scales and are favoured to the latter ones in terms of cost-performance ratio.

The designed and fabricated high-resolution piezoelectric rotary stage with an integrated closed-loop feedback control system is comparable (or more competitive) to analogous devices on the market with respect to the main performance characteristics and superior in terms of cost-effectiveness.

## **Research approbation**

The main results of this dissertation were published in seven scientific papers: four papers in Web of Science database-indexed journals with impact factor, one paper in a journal referred in another international database, and two national patents.

The research results were also presented in four international scientific conferences: Vibroengineering-2013 (Druskininkai, Lithuania), Mechanika 2014 (Kaunas, Lithuania), Vibroengineering-2014 (Katowice, Poland), and International Conference on Advances in Vibrations, 2015 (Porto, Portugal).

## Structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, five chapters, general conclusions, a list of 145 references, scientific publications on the topic of dissertation, and five appendices. The volume of the dissertation is 150 pages in total, including 40 formulae, 114 figures, and 16 tables.

## CONCLUSIONS

1. A comprehensive literature review of the existing high-precision rotary stages revealed that piezoelectric resonant USMs have a huge potential to be widely applied as driving elements in high-resolution rotary stages and positioners; however the main limiting issues are insufficient precision, complex structure, and relatively high manufacturing costs. It was also identified that polymeric incremental scales can offer a more favourable cost-performance ratio than the conventional glass-chromium incremental scales, and they can be used to measure precise angular displacements of rotary stages.
2. Theoretical investigation of the designed high-resolution piezoelectric rotary stage driven by resonant ultrasonic standing-waves was carried out. It was disclosed that:
  - i) The operational frequency interval of the piezocylinder is 125.8–132 kHz in the presence of driving voltage of 20–80 V. Elliptical motion trajectories of the contact zones in the axial-tangential plane form well-defined rotational motion of the rotor.
  - ii) Lumped-parameter analytical model of vibro-impact interaction dynamics between the piezocylinder and rotor showed that the recommended operational frequency of the piezocylinder should be equal to or span in the vicinity of resonant frequency, and there should be a small gap between the rotor and the contact zone element in the normal direction during the rotor motion. The model can be easily adapted to various piezoelectric rotary and linear motors utilising friction-based contact between input and output links.
  - iii) A numerical transient study of the piezocylinder interaction with the rotor under varying external loading (0–2 kg) conditions revealed that the time needed for the actual rotor motion to start is inversely and non-linearly dependent on the applied external load.
3. The results of experimental investigation of the designed piezoelectric rotary stage in terms of the main dynamic characteristics indicated that:
  - i) The operational resonant frequency of 126.26 kHz induces tangential and axial displacements of the top surface of the piezocylinder, thus generating elliptical motion trajectories of the contact zone elements in the clockwise and counter-clockwise directions. The highest displacement amplitudes are registered in the tangential direction, so the respective

oscillations are the driving ones in the entire range of applied voltage amplitudes (20–80 V).

- ii) The assessment of surface displacement of the piezocylinder by holographic interferometry confirms the suitability of the selected topology of electrodes and the excitation for a uniform displacement of the top and side surfaces.
  - iii) The values of average resolution of the developed piezoelectric rotary stage are 0.250  $\mu\text{rad}$  (clockwise motion) and 0.258  $\mu\text{rad}$  (opposite motion), which make the device superior to most of competitive products on the market. The dependence of resolution on the applied external load (0–2 kg) is non-linear, with the maximal resolution observed at 0.25 kg; a further increase in the load until the maximum results in a decrease of resolution by about 11 times.
  - iv) The influence of driving voltage (20–80 V) on the angular speed (28–66 rpm) of the rotor under the effect of varying external load (0–2 kg) is defined by a non-linear tendency for the speed to rise, when the supplied voltage increases. It is demonstrated that the torque of the rotor non-linearly increases with the increase in the driving voltage. A rise of the applied torque load imposes a non-linear decrease in the angular speed of the rotor under constant driving voltage.
  - v) Dynamic operation mode characterised by the generation of torsional oscillations concomitant with rotational motion of the rotor was exhibited. The novel mode is featured by slow bidirectional scanning-type motion of the rotor, thus very preferable in high-precision positioning systems.
4. Two polymeric (PET-based) incremental scales were fabricated combining optical microlithography and UV-nanoimprint techniques in order to possibly measure the angular displacement of the rotor of piezoelectric rotary stage. It was found that the surface roughness of the polymeric raster pattern is comparable to that of Si master mould. The decrease in optical transmittance of the scales in the 300–800 nm range is almost constant and does not exceed 5–6% of values for the photopolymer-uncoated PET substrate. Most of the diffracted light intensity of the scales is concentrated in the 0 and +/-1 diffraction orders. The differences in average diffraction intensities between the inspected scales do not exceed 5%.
  5. Geometric virtual model of the high-resolution piezoelectric rotary stage with a closed-loop feedback control system was developed, followed by a relatively simplified physical version produced afterwards. In terms of the main performance characteristics, this device is comparable (or more competitive) to analogous devices on the market and superior with respect to its cost-effectiveness. The proposed design of the piezoelectric stage is in the process of transfer into viable industrial product to be commercialised by the company Precizika Metrology.

UDK 681.586.773+537.226.86](043.3)

SL344. 2017-07-21, 2,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

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