



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Arvydas Šulgas

**GEODEZINIŲ PRIETAISŲ KALIBRAVIMO STENDO POZICIONAVIMO
STALIUKO PJEZO PAVAROS TYRIMAS**

**RESEARCH OF PIEZO DRIVE OF THE POSITIONING TABLE FOR THE
GEODESIC INSTRUMENT CALIBRATION STAND**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Mechatronikos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų mokslo kryptis

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Arvydas Šulgas

**GEODEZINIŲ PRIETAISŲ KALIBRAVIMO STENDO POZICIONAVIMO
STALIUKO PJEZOPAVAROS TYRIMAS**

**RESEARCH OF PIEZO DRIVE OF THE POSITIONING TABLE FOR THE
GEODESIC INSTRUMENT CALIBRATION STAND**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Mechatronikos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų mokslo kryptis

Vadovas doc.dr. K. Slivinskas

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantė lekt. A. Petrėtienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas _____

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Technologijos mokslo sritis

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Mechatronikos specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2009.01.12 Nr. 6

Vilnius

Studentui

Arvydas Šulgas

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Geodezinių prietaisų kalibravimo stendo pozicionavimo staliuko pjezopavaros tyrimas

patvirtinta 2008 m. gruodžio 11 d. dekanų potvarkiu Nr. 477me.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2009 m. gegužės 25 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Nagrinėjamos temos darbų apžvalga. Tyrimo uždavinių nustatymas. Teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai ir rezultatų analizė. Išvados ir pasiūlimai.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas

.....
(Parašas)

doc.dr. Kastytis Slivinskas

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
Arvydas Šulgas
(Vardas, pavardė)
.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk.

Data-....-....

Mechatronikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Geodezinių prietaisų kalibravimo stendo pozicionavimo staliuko
pjezopavaros tyrimas**

Autorius **Arvydas Šulgas**

Vadovas doc.dr. **Kastytis Slivinskas**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Nagrinėjama pjezoelektrinės pavaros pozicionavimo tikslumas ir pjezoelemento suveikimo laikas. Aprašomas tiriamas objektas, jo valdymo įrenginiai ir bandymams naudojama aparatūra. Aptariami atliktų bandymų rezultatai. Pateikiamos išvados ir rekomendacijos

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, apžvalga, tikslas ir uždaviniai, metodika, pjezoelektrinė pavarą, jos valdymo ir signalų registravimo prietaisų aprašymas, pjezo pavaros tyrimas, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 49 p. teksto be priedų, 52 iliustr., 25 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Pjezoelektrinė medžiaga, pjezovarikliai, rezonansas, virpesiai.

Vilnius Gediminas Technical University
Mechanics faculty
Machine production department

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-....-....

Mechatronics study programme bachelor (master) thesis.

Title: **Research of piezo drive of the positioning table for the geodesic instrument calibration stand**

Author **Arvydas Šulgis**

Academic supervisor doc.dr. **Kastytis Slivinskas**

Thesis language

☐

Lithuanian

☒

Foreign (English)

Annotation

The piezoelectric drive positioning accuracy and the piezo element play time are analyzed in the paper. The investigated object, its control and equipment for testing are described. Experimentation results are analyzed. Conclusion and recommendations are given.

The thesis consists of 8 parts: introduction, review of references, aim and objectives, methodology, piezo-electric actuator, the control signals, and recording facilities, conclusions and recommendations, the list of the references.

Thesis consist of: 49 p. of text without appendixes, 52 pictures, 25 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: Piezoelectric materials, piezo-electric actuator, resonance, vibrations.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
IVADAS	10
1. APŽVALGA.....	11
1.1. Kampų matavimo įranga ir kamparavimo būdai	11
1.2. Kampinio pozicionavimo tikslumo įvertinimas	14
1.3. Pjezoelektrinis reiškinyss	15
1.4. Pjezoelektra	16
1.5. Paviršinės bangos pjezoelektrikuose	18
1.6. Pjezoelektrinės medžiagos.....	19
1.7. Pjezovarikliai	21
1.8. Pjezoelektrinių pavarų apžvalga	23
1.8.1. Mikroimpulsinės piezokeramimės pavaros	23
1.8.2. Suspaudimo tipo pjezo variklis	24
1.8.3. Linijinė, ultragarsinė pjezoelektrinė pavara	25
1.8.3.1. Pjezoelemento matavimas trimačiu vibrometru	26
1.9. Aktyvios atramos.....	27
1.9.1. Aktyvieji pjezoelektriniai elementai.....	27
1.9.2. Suminis pjezoelektrinis koregavimas.....	27
1.10. Neharmoniniai virpesiai.....	28
1.10.1. Neharmoniniai rezonansiniai virpesiai pjezoelektriniuose varikliuose	28
1.10.2. Įėjimo grandies išilginių virpesių savieji dažniai ir jų valdymo galimybės	31
1.11. Fotoelektrinis kampo keitiklis	33
2. LITERATŪROS PAŽVALGOS APIBENDRINIMAS.....	35
3. TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	36
4. DARBO ATLIKOMO METODIKA	36
5. PJEZOELEKTRINĖ PAVARA, JOS VALDYMO IR SIGNALŲ REGISTRAVIMO PRIETAISAI	37
5.1. Tyrimo stendas	37
5.2. Pjezo elementas	38
5.3. Tyrimo stendas ir prietaisai	39
5.4. Tiriamos sistemos struktūrinė schema.....	42
5.5. Stačiakampių impulsų formavimo įrenginys (5.11 pav., 5 veikimo paaiškinimas)	43

6. PJEZO PAVAROS TYRIMAS	44
6.1. Disko pasukimo tikslumo tyrimas	44
6.2. Pjezoelemento suveikimo laikas.....	46
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	47
LITERATŪRA	48
PRIEDAI:	
1 PRIEDAS. Konferencijos straipsnis	

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Poligonas su aštuoniais veidrodiniais paviršiais.....	11
1.2 pav. Poligono/autokolimatoriaus veikimo principas: a) veidrodžio šviesos atspindys; b) autokolimatoriaus veikimo principas.....	11
1.3 pav. Supaprastinta Moore's Precision Index įrenginio schema: a) matavimo padėtis, b) kampo keitimo padėtis.....	12
1.4 pav. Lazerinis girometras: 1 – šviesos šaltinis (lazeris); 2 – optinis šviesos kreiptuvas; 3 – šviesos priėmėjas (fotodiodas); 4 – optinė prizmė.....	13
1.5 pav. Bendra kalibravimo stendo schema.....	14
1.6 pav. Tiesioginis pjezoelektrinis reiškinyss.....	15
1.7 pav. Atvirkštinis pjezoelektrinis reiškinyss.....	15
1.8 pav. Pjezoelekto kilmė linijiniame kristale. a - nepaveikta gardelė, b - deformuota.....	16
1.9 pav. Kvarcas (SiO_2).....	20
1.10 pav. Pjezoelektriniai dipoliai.....	20
1.11 pav. Pjezokeramikų poliarizacija: a – prieš poliarizacija; b – poliarizacijos metu; c – po poliarizacijos.....	21
pav. Energijos keitimas pjezovarikliuose.....	21
1.13 pav. Bendroji pjezovariklio struktūra.....	22
1.14 pav. Pjezoelektrinių pavarų klasifikacija.....	23
1.15 pav. Parodas mikroimpulsinis pjezokeraminis variklis su įstrižais elektrodais.....	23
1.16 pav. Prof. Banseviciaus pjezo keramine pavara, 1977 m.....	24
1.17 pav. Suspaudimo tipo pjezoelektrinio variklio veikimo principas.....	24
1.18 pav. Pjezoelemento dydis.....	25
1.19 pav. Linijinė pjezoelektrinė pavara.....	25
1.20 pav. Baiginių elementu metodų suprojektuotos pjezoelemento deformacijos.....	26
1.21 pav. Simetrinis pjezoelemento žadinimas.....	26
1.22 pav. Asimetrinis pjezoelemento žadinimas.....	26
1.23 pav. Precizinių staklių matavimo stendas su pjezoelektrine pavara.....	23
1.24 pav. Sinusinis koregavimas mašinos konstrukcijoje, taikant aktyviuosius elementus.....	28
1.25 pav. Neharmoninių virpesių variklio veikimo principas (S grandies poslinkis).....	28

1.26 pav. Neharmoninių rezonansinių virpesių pjezoelektrinio variklio schema (a) ir maketas (b)	29
1.27 pav. Pjūklo formos virpesys, susidedantis iš penkių harmonikų, kai signalai yra priešingų kryptų	29
1.28 pav. Teorinis neharmoninis virpesys, susidedantis iš dviejų harmonikų kryptų (a) ir (b)	30
1.29 pav. Dviem sinchronizuotais harmoniniais elektriniais signalais (a) ir vienu pjūklo formos signalu (b) (išjungus elektrinį signalą matomas pereinamas procesas) žadinamos pjezokeraminės įėjimo grandies virpesiai	30
1.30 pav. Pastovaus skerspjūvio ploto gembiskai per tarpinį elementą įtvirtinto strypo modelis	31
1.31 pav. Grafinis lygties sprendimas	31
1.32 pav. Laisvo pastovaus skerspjūvio ploto strypo su pridėtine mase viename jo gale modelis	32
1.33 pav. Grafinis (1.28) lygties sprendimas	32
1.34 pav. Laisvo strypo su pridėtine mase pirmosios išilginių virpesių formos mazge modelis	32
1.35 pav. Grafinis (1.29) lygties sprendimas	33
1.36 pav. Fotoelektrinis kampo keitiklis	33
1.38 pav. Didelio tikslumo kampų matavimo schemas	34
5.1 pav. Tiriamasis stendas	37
5.2 pav. Pjezo elementas	38
5.3 pav. Tiriamasis stendas ir jo valdymo bei duomenų nuskaitymo prietaisai	39
5.4 pav. Transformatorius	39
5.5 pav. Oscilografu matuota įtampa	40
5.6 pav. Stačiakampių impulsų formavimo įrenginys	40
5.7 pav. Precizika Metrology fotoelektrinis kampų keitiklis A58-F	41
5.8 pav. Fotoelektrinio kampų keitiklio impulsų registratorius LINOMA R1	41
5.9 pav. Brüel & Kjær pagreičio jutiklių (akselerometrų) stiprintuvai 2626	41
5.10 pav. Bekontakčio poslinkio jutiklio stiprintuvas KWS 503D	41
5.11 pav. Tiriamos sistemos struktūrinė schema	42
6.1 pav. Fotoelektrinio kampo keitiklio fiksuojamas signalas	45
6.2 pav. Disko linijinis poslinkis vieno impulso metu: a – poslinkis 9 μm , b – poslinkis 9,4 μm	45
6.3 pav. Stačiakampių impulsų formavimo įrenginys	46

ĮVADAS

Matavimo ir kalibravimo prietaisams yra keliami ypatingi tikslumo reikalavimai. Šių prietaisų pavaros turi būti mažų matmenų, patikimos, įvairių greičių, turi dirbi žemose ir aukštose temperatūrose. Taip pat turi dirbti įvairiose darbo aplinkose, pvz.: vakuumo ir radiacijos ir t. t.

Pjezoelektriniai varikliukai turi visas šias savybes. Jie veikia tyliai, yra paprastos konstrukcijos, mažų matmenų, nes neturi įprastoms pavaroms būdingų sudedamųjų dalių (reduktoriaus, krumpliaračių, diržo ir pan.). Jų galios ir dydžio santykis yra didelis. Kol kas pjezoelektriniai varikliai savo charakteristikomis ir galia negali prilygti buityje ir pramonėje naudojamiems tradiciniams elektros varikliams, tačiau jie yra naudojami ir labai svarbūs mažų precizinių sistemų pavarose.

Pjezoelektriniams varikliams būdinga: maži matmenys, greitas veikimas, paprastas valdymas ir kt. Šias savybes galima pritaikyti geodezinių kampų kalibravimo prietaisų tiksliam pasukimui.

1. APŽVALGA

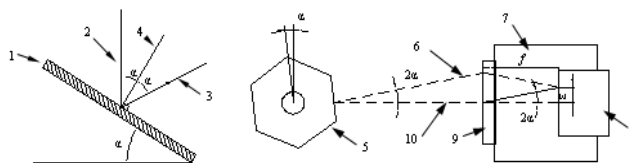
1.1. Kampų matavimo įranga ir komparavimo būdai

Poligonas/autokolimatorius. Stendo centre bazuojama precizinio tikslumo daugiakampė prizmė – poligonas. Precizino tikslumo daugiakampė prizmė turi veidrodinius paviršius, tarp kurių yra labai tikslus kampas. Dažniausiai daugiakampę prizmę sudaro 12 – 20 arba 24, 36, o kartais net 72 paviršiai (1.1 pav.). Daugiakampės prizmės dažniausiai gaminamos iš plieno arba kvarcinio stiklo [1].



1.1 pav. Poligonas su aštuoniais veidrodiniais paviršiais

Autokolimatorius – tai prietaisas naudojamas tikslų kampų palyginimui, naudojant veidrodžio atspindį. Autokolimatoriaus veikimo principas pagrįstas šviesos šaltinio atspindžiu nuo veidrodinio paviršiaus (1.2 pav.).



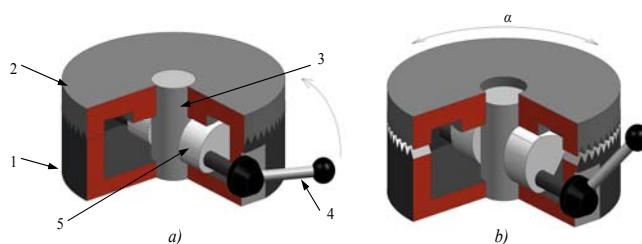
1.2 pav. Poligono/autokolimatoriaus veikimo principas: a) veidrodžio šviesos atspindys; b) autokolimatoriaus veikimo principas

Kampas tarp siunčiamo ir atsispindėjusio šviesos srauto yra lygus 2α . Kampo matavimas tarp siunčiamo ir atsispindėjusio šviesos srauto leidžia nustatyti veidrodinio paviršiaus padėtį. Autokolomatoriaus šviesos srautas (taškas, linija ar kokia kita forma) siunčiamas į daugiakampės prizmės paviršiaus plokštumą 5, tuo pat metu jis grįžta į autokolimatoriaus okuliarą. Jei daugiakampės prizmės veidrodinio paviršiaus statmuo 4 nėra vienoje linijoje su autokolimatoriaus

ašimi, t. y. su iš autokolimatoriaus išleidžiamu siunčiamu šviesos srautu 10, tai tada prizmės statmuo su autokolimatoriaus ašimi sudarys kampą α . Atspindėjęs šviesos srautas 6 su autokolimatoriaus ašimi 10 sudarys kampą 2α . Atspindėjęs šviesos srautas per objektyvą 9 patenka į okuliarą 8. Paskaičiavus atstumą ϵ tarp siunčiamo grįžusio į okuliarą šviesos srauto galima nustatyti daugiakampės prizmės kampinę padėtį.

Moore's Precision Index įrenginys. Šiuo įrenginiu yra pasiekiamas labai didelis kampo pozicionavimo tikslumas, kurio paklaida neviršija 0,1". Jo pagrindinę dalį sudaro dviejų disko pavidalo detalių sukabinimas dantukais, esančiais galiniuose šių diskų paviršiuose (1.3 pav.). Šio prietaiso principinis išradimas buvo patentuotas firmoje *Moore* (JAV), o jo pagrindu buvo sukurti kampų matavimo prietaisai ir Lietuvoje [2].

Prietaiso pagrindo 1 viršutinėje žiedinėje dalyje yra įpjauti maži dantukai, turintys trikampi, plokščią arba rutulio dalies profilį, o dantukų pašaknyse – griovelius, kad dantukų sukabinimas būtų laisvas ir garantuotas, nebūtų ribojamas dantukų viršūnių netikslumų. Toks pat skaičius dantukų įpjautas viršutinio disko 5 žiediniame galiniame paviršiuje. Pasukus rankenėlę 7, kumštelis 6 per įvorę 4 pakelia viršutinį diską 5, dantukai atsiskiria ir diską galima pasukti norimu kampu. Po to jis vėl nuleidžiamas, dantukai susikabina, fiksuodami tikslią kampo padėtį [3].



1.3 pav. Supaprastinta Moore's Precision Index įrenginio schema: a) matavimo padėtis, b) kampo keitimo padėtis

Optinė skalė/mikroskopas. Reikalinga labai tiksli apskritiminė skalė ir vienas arba keli mikroskopai (priklausomai nuo matavimo metodų) skalei nuskaityti.

Naudojant šį matavimų būdą pagaminamas apskritiminis diskas su ant jo įpresuota apskritimine skale. Daugelyje labai tikslų matavimo prietaisų pamatinio mato skalės dažniausiai gaminamos iš specialios medžiagos, vadinamos niuzilberiu (vok., *neusilber*, pažodžiui – naujasis sidabras, - vario lydinys, turintis 20% cinko ir 15% nikelio) arba sidabro juostelių, įpresuotų į griovelį, esantį kito matalo (daugiausia bronzos) disko paviršiuje [1].

Matavimo tikslumas matuojant optine skale/mikroskopu priklauso nuo šių veiksnių:

- skalės padalų kokybės;
- matavimo proceso kokybės;

- mikroskopų kokybės;
- guolių ekscentriciteto;
- guolių susidėvėjimo.

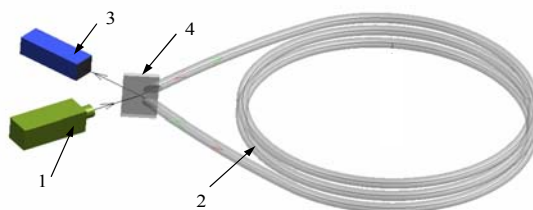
Apskritiminio disko kampinės padėties nustatymui naudojami mikroskopai. Limbo padėtis nustatoma naudojant linijines vertes. Žinant skalės skersmenį apskritiminio disko kampinę vertę galima paskaičiuoti [4].

Kampiniai keitikliai. Ši kampų matavimo priemonė yra plačiausiai taikoma mūsų dienomis. Kampiniai keitikliai yra naudojami metalo pjovimo staklių sukamųjų stalų pasukimo kampams matuoti ir valdyti, matavimo prietaisų kampų atskaitymo ir matavimo sistemose, pramoninių robotų kampinių dydžių matavimo ir valdymo sistemose. Kampinių keitiklių veikimas pagrįstas fotoelektriniu principu [5].

Didesnio tikslumo kampiniai keitikliai veikia fotoelektrinio skenavimo principu [6](Heidenhain). Fotoelektrinio principo veikimas yra bekontaktis, todėl nesidėvintis. Šis metodas skenuoja keleto mikronų pločio linijas ir generuoja išėjimo signalus labai mažais periodais. Pagal skenavimo veikimo principus fotoelektriniai kampo keitikliai skirstomi:

- optinio skenavimo;
- interferencinio skenavimo.

Lazerinis girometras. Šis prietaisas dėl optinių šviesolaidžių (du šviesos spinduliai juda priešingomis kryptimis susuktame šviesolaidyje) naudojimo tapo itin kompaktiškas, teikiantis labai didelio diskretiškumo informaciją. Tai labai plačiai techniniams matavimams naudojamas prietaisas [7]. Jo principinę schemą sudaro klasikinio girometro konstrukcija. Kvarcinio stiklo prizmės vidiniame paviršiuje du priešingomis kryptimis einantys lazerio spinduliai interferuoja, fotoelementas registruoja interferencinių juostų kitimą, o interferencijos periodas dar gali būti interpoliuojamas. Kampo vertę ir jos pokytį galima išmatuoti 0,1'' arba net 0,01'' diskretiškumu. Matavimo tikslumas taip pat yra labai didelis, sistemingoji matavimo paklaida nevirsija kelių dešimtųjų kampo sekundės. Prietaisas tinka naudoti navigacijos tikslams, juo galima matuoti sukimosi kampą, kampinius greičius ir pagreičius.



1.4 pav. Lazerinis girometras: 1 – šviesos šaltinis (lazeris); 2 – optinis šviesos kreiptuvas; 3 – šviesos priėmėjas (fotodiodas); 4 – optinė prizmė

1.2. Kampinio pozicionavimo tikslumo įvertinimas

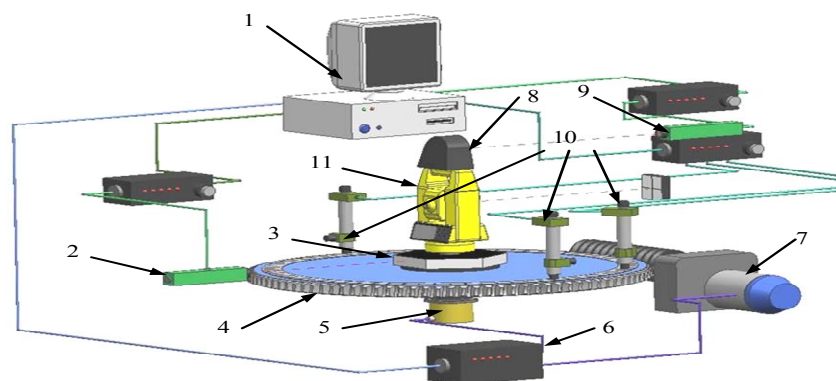
Vilniaus Gedimino technikos universiteto geodezijos institute yra sukurtas stendas specializuotas kampų matavimo geodezinių prietaisų kalibravimui. Stendo kūrimui panaudota tiksli (~3") ir standi apskrito dalinimo mašina, įdiegiant joje automatinį kompiuterinį valdymą.

Apskrito dalinimo mašina (1.5 pav.) buvo modernizuota – įmontuotas precizinis kampo keitiklis 5, žingsninis variklis su globoidine sliekine pavara 7, bei viso stendo veikimą valdantis elektroninis blokas 6 ir kompiuteris 1 [8].

Stendo stalo pasukimo kampinė padėtis nurodoma kompiuteryje. Duomenys perduodami į valdymo bloką, pastarasis siunčia impulsus žingsniniam varikliui tol, kol kampinis keitiklio rodmuo pasiekia kompiuteryje įvestą rodmenį (t.y. stalas pasukamas į reikiamą padėtį).

Kampinio keitiklio rodmenys (stalo kampinė padėtis) lyginami su tikrinamojo prietaiso rodmenimis bei įvertinus prietaiso sukamos dalies kampinę padėtį, nustatomos prietaiso rodmenų paklaidos.

Siekiant tikrinti ir palyginti matavimus, prie stendo sumontuoti papildomi prietaisai – poligonas 3 su autokolimatoriumi 2, bei mikroskopai 10, naudojantys įmontuotą į sukamą stalą skalę, kaip kampo etaloną. Tiek autokolimatoriai (disko kampinės ir geodezinio prietaiso padėties nustatymo), tiek ir mikroskopai buvo modernizuoti panaudojus CCD elementus, leidžiančius nuskaityti skalės brūkšnio padėtį ir rodmenis perduoti į kompiuterį.

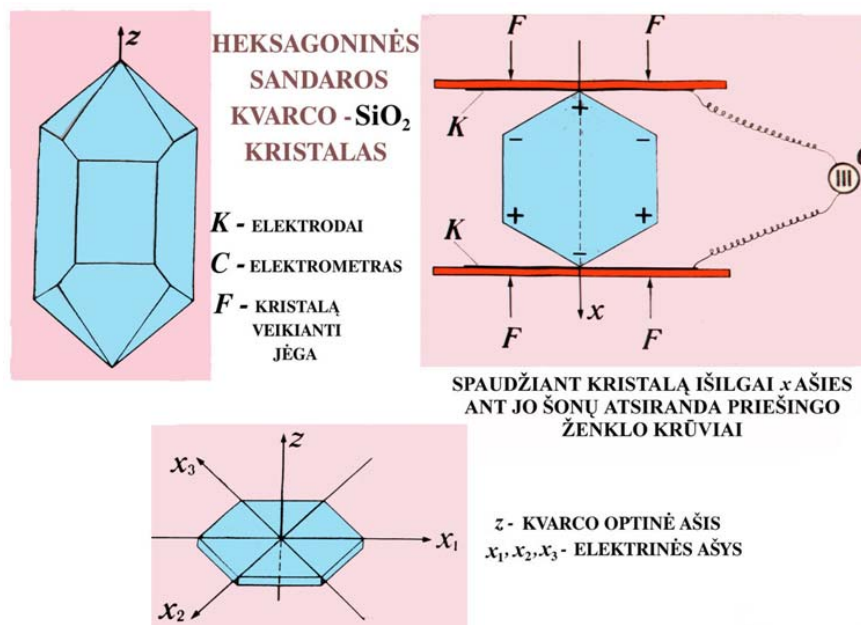


1.5 pav. Bendra kalibravimo stendo schema: 1 – kompiuteris, 2 – autokolimatorius, 3 – daugiakampė prizmė, 4 – sukamasis stalas (sliekratis), 5 – fotoelektrinis kampo keitiklis, 6 – stalo pavaros valdymo blokas, 7 – žingsninis variklis su sliekine pavara, 8 – tikrinamojo prietaiso pozicionavimo veidrodis, 9 – tikrinamojo prietaiso padėties nustatymo autokolimatorius, 10 – mikroskopai, 11 – tikrinamasis geodezinis prietaisas

1.3. Pjezoelektrinis reiškiny

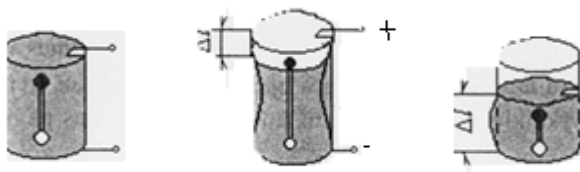
Kristalų struktūros ir pjezoelektrinių reiškinių ryšį 1880 m. pirmą kartą nustatė broliai Pjeras ir Žakas Kiuri. Eksperimentuodami su kristalais (turmalinu, kvarcu, Segneto druska) jie aptiko, kad veikiant slėgiui šių kristalų paviršiuje atsiranda elektros krūviai. Šis atradimas buvo pavadintas pjezoelektra, o medžiagos, kuriose jis pasireiškia – pjezoelektrinėmis medžiagomis. Jie numatė, kad galimas ir atvirkštinis pjezoreiškinys, kuris buvo įrodytas metais vėliau.

Pjezoelektrinis reiškiny yra pjezoelektrinių medžiagų paviršiuose atsirandantis elektros krūvis veikiant mechaniniams įtempimams arba jų deformaciją veikiant elektriniam laukui [9]. Tiesioginio pjezoreiškinio esmė parodyta 1.6 pav. Pjezoelementą slegiant ir tempiant, jo galuose atsirandančių elektros krūvių ženklai pasikeičia priešingais.



1.6 pav. Tiesioginis pjezoelektrinis reiškiny

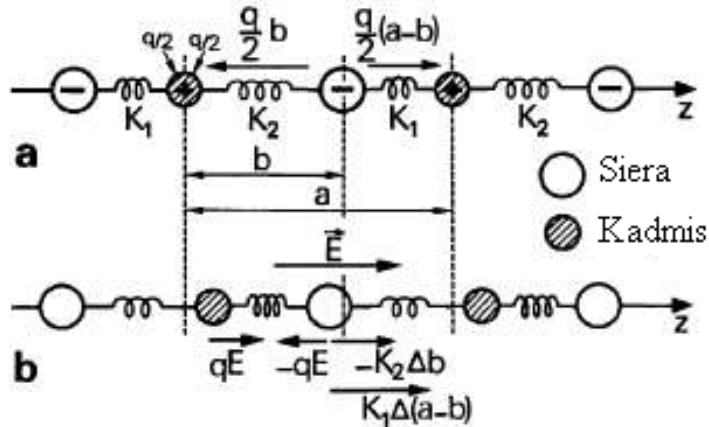
Esant atvirkštiniam pjezoreiškiniui dėl paviršių įsielektrinimo arba elektrinio lauko poveikio, pjezoelementas pailgėja arba sutrumpėja (1.7 pav.). Tai priklauso nuo įelektrinimo poliškumo arba elektrinio lauko krypties.



1.7 pav. Atvirkštinis pjezoelektrinis reiškiny

1.4. Pjezoelektra

Kūnų savybė elektriškai poliarizuotis juos deformuojant, vadinama pjezoelektriniu reiškiniu [10]. Jis gali atsirasti tik kūnuose, neturinčiuose simetrijos centro. Šį efektą pabandysime paaiškinti sąveikaujantiems krūviams, išsidėsčiusiems vienoje linijoje. Tokiu modeliu gali būti **CdS** kristalinė gardelė, kurią sudaro du susijungę **Cd** ir **S** atomai, išsidėstę eilute išilgai heksagoninės ašies.



1.8 pav. Pjezoelekto kilmė linijiniame kristale. a – nepaveikta gardelė, b – deformuota.

Šią grandinę sudaro du dipoliai, kurių dipoliniai momentai yra $\frac{q}{2}(a-b)$ ir $\frac{q}{2}b$. Vienos molekulės dipolinis momentas bus šių abiejų momentų suma, o n molekulių dipolinis momentas bus:

$$P_0 = \frac{nq}{2}(a-2b) \quad (1.1)$$

Veikiant deformacijai kadmio ir sieros atomai pasistums vienas kito atžvilgiu ir atstumų pokytis pakeis dipolinius momentus ir bendrą dipolinį momentą. Jo pokytis bus:

$$P = \Delta P_0 = \frac{nq}{2}(\Delta a - 2\Delta b) \quad (1.2)$$

Tai ir bus pjezoelektrinis efektas, dar vadinamas tiesioginiu pjezoelektriniu efektu. Elektrinis laukas, veikiantis tokį dipolį, veikia taip, kad teigiami ir neigiami krūviai pasislenka į priešingas puses ir atstumai tarp dipolių pakinta – atsiranda dipolio deformacija. Suraskime ryšius tarp mechaninių (įtempimo bei deformacijos) ir elektrinių (lauko stiprumo ir indukcijos) dydžių. Dėl statinės pusiausvyros dipolio pokytis ir susikūrus laukas turi kompensuoti vienas kitą, taigi

$$-qE + K_1\Delta(a-b) - K_2\Delta b = 0 \quad (1.3)$$

Iš čia:

$$\Delta b = -\frac{qE}{K_1 + K_2} + \frac{K_1}{K_1 + K_2}\Delta a \quad (1.4)$$

$$P = \frac{nq}{2} = \left[\frac{2qE}{K_1 + K_2} + \frac{K_2 - K_1}{K_1 + K_2} \Delta a \right] \quad (1.5)$$

Pirmasis šios sumos narys $\chi_{ion} = \frac{nq^2}{K_1 + K_2}$ nusako joninį poliarizuojamumą, o antrasis proporcingas gardelės deformacijai $S = \frac{\Delta a}{a}$. Galutinai tiesioginiam pjezoelektriniam efektui turėsime

$$P = \chi_{ion} E + eS \quad (1.6)$$

Čia pjezoelektrinė pastovioji bus išreiškiama

$$e = \frac{nq}{2} = \left(\frac{K_2 - K_1}{K_2 + K_1} \right) a \quad (1.7)$$

Visa poliarizacija įskaitant ir elektroninę bus

$$P = (\chi_{ion} + \chi_e) E + eS \quad (1.8)$$

Veikiančios bipolius jėgos yra

$$F_1 = K_1 \Delta(a - b) \quad (1.9)$$

$$F_2 = K_2 \Delta b \quad (1.10)$$

Iš čia mechaninis įtempimas, t.y. veikianti vienetinį paviršinį plotą bus (N grandinėlių tankis lygus na)

$$T = \frac{N}{2} K_1 \Delta(a - b) + \frac{N}{2} K_2 \Delta b \quad (1.11)$$

Tada turėsime

$$T = \frac{na}{2} [K_1 \Delta a + (K_2 - K_1) \Delta b] \quad (1.12)$$

Ir įstatę Δb turėsime išraišką

$$T = \frac{na}{2} \left(\frac{2K_2 K_1 \Delta a}{K_2 + K_1} - \frac{K_2 - K_1}{K_2 + K_1} qE \right) \quad (1.13)$$

Arba įvedę žymėjimą $c = \frac{na^2 K_1 K_2}{K_2 + K_1}$, kuris reiškia stangrumo koeficientą turėsime

$$T = cS - eS \quad (1.14)$$

Galutinai turėsime lygtis aprašančias pjezoelektrinį efektą

$$D = \varepsilon E + eS \quad (1.15)$$

$$T = cS - eE \quad (1.16)$$

Tikram kristalui šios lygtys turėtų būti tenzorinėmis lygtimis, nes elektrinis laukas yra vektorius, o deformacija bei įtempimas yra tenzoriai. Tokiu būdu dielektrinė, stangrumo bei pjezoelektrinė pastoviosios yra tenzoriniai koeficientai.

$$D_m = \varepsilon_{mn} E_n + e_{mnl} S_{nl} \quad (1.17)$$

$$T_{mk} = c_{mknl} S_{nl} - e_{mkn} E_n \quad (1.18)$$

Šiose formulėse vykdomas sumavimas pagal pasikartojančius indeksus.

Bangų sklidimui pjezoefektas truputį keičia bangų greitį, priklausomai nuo to, koks yra jo dydis. Sąveikai su elektriniu lauku įvedamas mechaninio ryšio koeficientas

$$K = e / (\varepsilon c + e^2)^{1/2}, \quad (1.19)$$

o santykinis greičio pokytis proporcingas $K^2 / 2$.

1.5. Paviršinės bangos pjezoelektrikuose

Viskas labai panašu, kaip ir paprastuose kietuosiuose kūnuose, tik paviršiuje atsiranda papildomas elektrinis potencialinis laukas (dėl daug mažesnio šių bangų greičio už šviesos greitį) [10]. Aplinkoje šis laukas susijęs su dalelių poslinkiu joje, tuo tarpu tolystant nuo kietojo kūno ribos jis sparčiai mažėja - ore jis silpsta pagal dėsnį e^{-kx} .

Be to pjezoelektrinėje aplinkoje gali egzistuoti grynai skersinės paviršinės bangos. Jų mažėjimas į kristalo tūrį yra mažas, todėl jos giliau prasiskverbia į kristalo tūrį ir jų greitis

mažai skiriasi nuo skersinių bangų greičio $V = V_T \sqrt{1 - \frac{K^4}{1 + (\varepsilon / \varepsilon_0)^2}}$ laisvame paviršiuje ir $V = V_T \sqrt{1 - K^4}$ metalizuotame paviršiuje.

Kraštinės sąlygos paviršinėms bangoms - įtempimai paviršiuje turi būti lygūs nuliui $T_{3i} = 0$, duoda tris lygtis. Be to, dvi elektrinio lauko kraštinės sąlygos (aplinkų riboje statmenos paviršiui elektrinės indukcijos dedamosios ir potencialai yra lygūs) gali būti suvestos į vieną

$$\frac{\Phi(0)}{D_3(0)} = j \frac{V^2}{w} Z_s \quad (1.20)$$

čia Z_s yra paviršinis efektyvus impedansas.

Šiuo atveju elastingos kraštinės sąlygos irgi gali būti suvestos į vieną

$$\Delta_1(V) + V Z_s \Delta_2(V) = 0 \quad (1.21)$$

čia A_1 ir A_2 yra determinantai gaunami iš elastinių kraštinių sąlygų. Jeigu paviršius yra padengtas metalu, t.y. metalizuotas, tai paviršinis krūvis lygus nuliui, nes metale

potencialas lygus nuliui, o laisvam paviršiui $D_3(0) = -k \varepsilon_0 \Phi(0)$, tai $Z_s \frac{j}{\varepsilon_0 V}$. Galime įvesti efektyvų elektromechaninio ryšio koeficientą K_{ef} , kuris bus išreiškiamas taip

$$\frac{K_{ef}^2}{2} = \frac{V_s - V_0}{V_s} \quad (1.22)$$

Vietoje paviršiaus krūvio galime įvesti efektyviąją dielektrinę skvarbą $\varepsilon \equiv \frac{D}{E}$, kuri bus užrašoma taip

$$\varepsilon_{sf} = - \frac{D_3(0)}{\frac{w}{V} \Phi(0)} \quad (1.23)$$

Abi išraiškos gali būti naudojamos priklausomai nuo to, kuriuos dydžius jums patogiau vartoti. Šiuos efektyvius dydžius patogiau naudoti sluoksninėms sandaroms ant pjezoelektriko nagrinėti, pvz. metalizuotiems paviršiams ir pan., kada mechaninis poveikis yra menkas arba jis visiškai panaikinamas nesant tiesioginio mechaninio kontakto tarp dviejų aplinkų.

1.6. Pjezoelektrinės medžiagos

Visos medžiagos, kurioms yra būdingas pjezoelektrinis reiškinys, vadinamos pjezoelektrinėmis medžiagomis [9]. Jos skirstomos į tris grupes:

1) natūralieji (kvarcas (1.9 pav.), Segneto druska) ir sintetiniai (licio sulfatas, amonio ortofosfatas) kristalai;

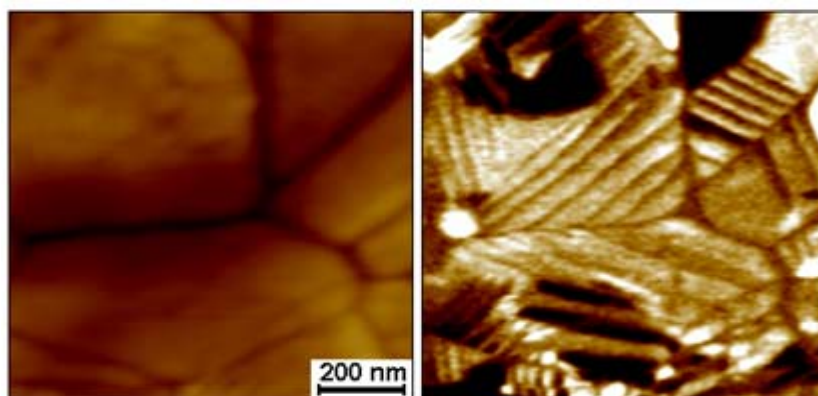
- 2) poliarizuotoji feroelektrinė keramika;
- 3) kai kurių polimerų plėvelės.



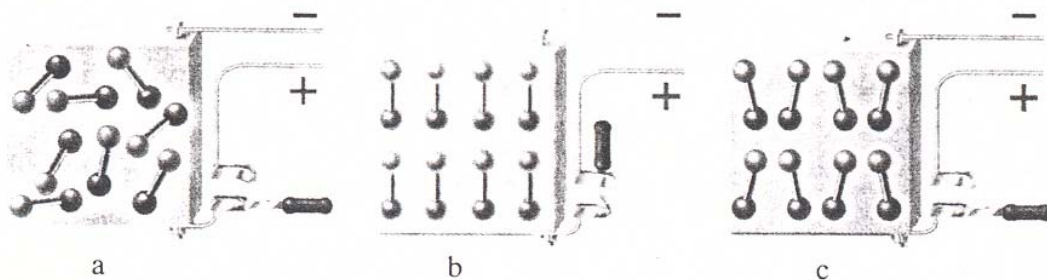
1.9 pav. Kvarcas (SiO_2)

Pagaminti pjezokeramikos elementai yra izotropiški ir nepasižymi pjezoelektrinėmis savybėmis, nes jų elektrinių dipolių (1.10 pav.) orientacija yra chaotiska (1.11 pav., a). Kad atsirastų pjezoelektrinės savybės, būtinas elektrinių dipolių poliškumas, t. y. jų orientacija elektrinio lauko atžvilgiu.

Prijungus įtampą ir veikiant nuolatiniam laukui, elektriniai dipoliai orientuojasi lauko linijų kryptimi (1.11 pav. b). Beveik tokia pati orientacija išlieka ir išjungus įtampą (1.11 pav., c). Taip susidaro pjezokeramikai reikalinga liekamoji poliarizacija.



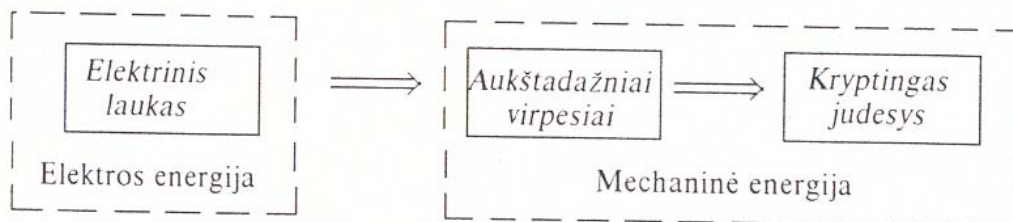
1.10 pav. Pjezoelektriniai dipoliai



1.11 pav. Pjezokeramikų poliarizacija: a – prieš poliarizaciją; b – poliarizacijos metu; c – po poliarizacijos

1.7. Pjezovarikliai

Pjezovariklis (angl. *piezomoto*; *ultrasonic motor*; vok. *Piezomotor*) yra pjezomechaninis energijos keitiklis, kuriame aukštadažniai mechaniniai virpesiai sukelia tolygų išėjimo grandies sukamąjį, slenkamąjį arba žingsninį judesį [9,10]. Čia vyksta energijos keitimas, kuriam naudojamas elektrinis laukas (1.12 pav.). Veikiant elektriniam laukui gaunami aukštadažniai pjezoelemento virpesiai, kurie per kontakto tašką arba paviršių sąlytiniu (sausosios trinties) būdu sukelia nepertraukiamą išėjimo grandies judesį. Pjezomechaninėse sistemose gali būti ir kelios energijos keitimo pakopos



1.12 pav. Energijos keitimas pjezovarikliuose

Lyginant su kitais varikliais, paminėtini šie pjezovariklių privalumai:

1. Didelis masės ir galios santykis.
2. Mažas reakcijos laikas (kelios mikrosekundės).
3. Gerai tinka mikropozicionavimui, dėl mažų pjezoelektrinių medžiagų deformacijų gaunami labai maži judamosios dalies poslinkiai
4. Nekuria magnetinių laukų, todėl gerai tinka tokiems įrenginiams, kuriuose magnetiniai laukai neleidžiami.

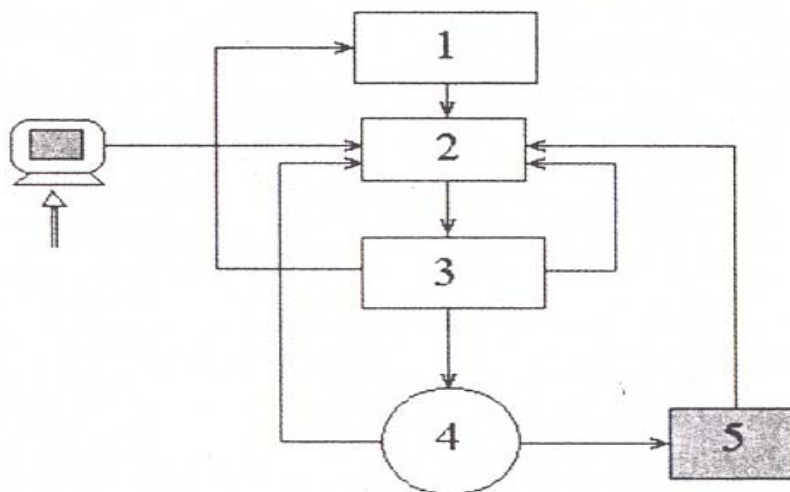
5. Kompaktiškumas, nedidelis inertiškumas ir geros darbinės, paleidimo ir stabdymo charakteristikos.
6. Gerai pritaikomi ir įmontuojami įvairiuose įrenginiuose.
7. Nereikalingi reduktoriai, nes galima gauti mažus greičius, esant dideliam sukimo momentui.
8. Paprasta konstrukcija.
9. Tylus veikimas.

Trūkumai:

1. Būtina naudoti aukšto dažnio energijos šaltinį.
2. Kontaktiniai paviršiai turi būti atsparūs trinčiai.

Šiuo metu yra sukurta daug įvairių pjezovariklių konstrukcijų, tačiau visos jos yra bendros struktūros, kuri parodyta 1.13 pav.

Schemoje pažymėta: 1 – aukštadažnių elektrinių virpesių generatorius, turintis kelis išėjimus, kurių signalai yra skirtingo dažnio ir fazės; 2 – valdymo sistema, kuri pagal valdymo signalą vykdo pjezokeitiklių įtampos komutaciją; ir moduliaciją; 3 – pjezokeitiklis, elektrinę įtampą keičiantis į mechaninius virpesius; 4 – netiesinis elementas kontakto vietoje, kurioje pjezokeitiklio virpesiai keičiami išėjimo grandies 5 poslinkiu.



1.13 pav. Bendroji pjezovariklio struktūra

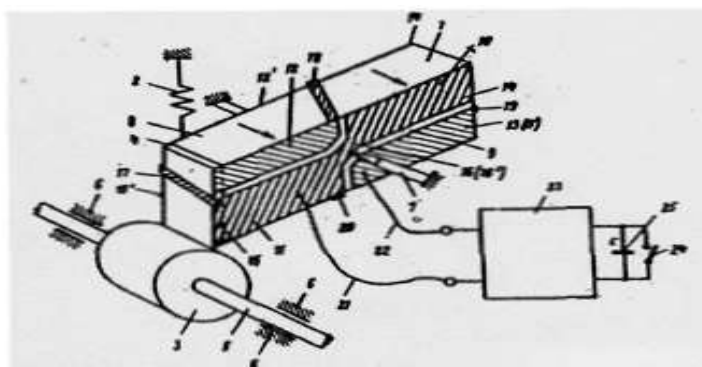


1.14 pav. Pjezoelektrinių pavarų klasifikacija

1.8. Pjezoelektrinių pavarų apžvalga

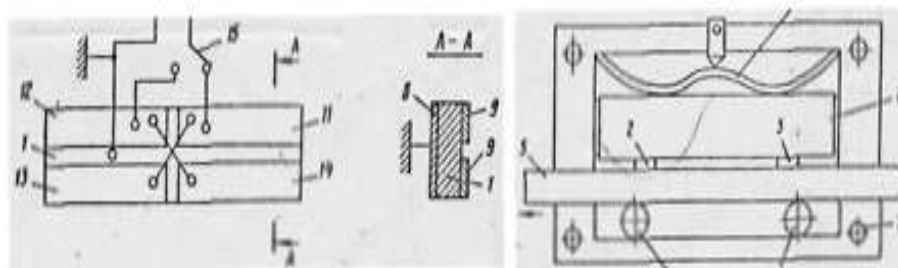
1.8.1. Mikroimpulsinės piezokeramimės pavaros

Šios pavaros (1.15 pav.) judesys atliekamas pjezo keramikai pailgėjant išilgai arba piezokeramika lenkiantis iš viršaus į apačią, taip gaunamas judesys į abi puses.



1.15 pav. Parodas mikroimpulsinis piezokeraminis variklis su įstrižais elektrodais [11].

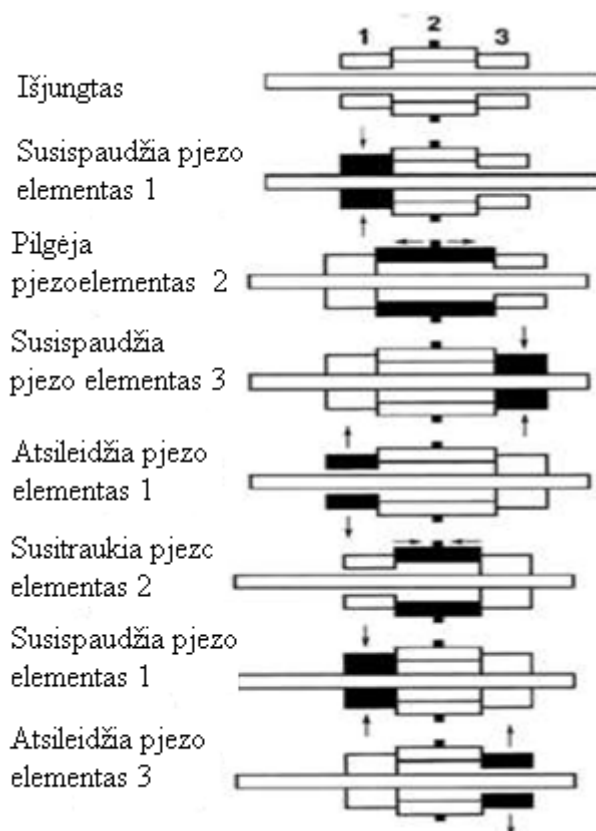
Kitas mikroimpulsinės pjezo keraminės pavaros tipas parodyta 1.16 pav, šią principą sugalvojo prof. R. Bansiavicius [12]. Pjezoelektrinė pavaros veikimas yra pagrįstas piezokeramikos deformavimu išilginiu ir lenkimo būdu vienu metu. Šio variklio sukimosi kryptis pakeičiama, perjungiant įstrižai išdėstytus elektrodus.



1.16 pav. Prof. Bansevičiaus pjezokeramine pavara, 1977 m.

1.8.2. Suspaudimo tipo pjezo variklis

Pirmas suspaudžiamos piezo pavaros projektas buvo pasiulytas Burleigh Instruments 1974. [13]. (1.17 pav.)

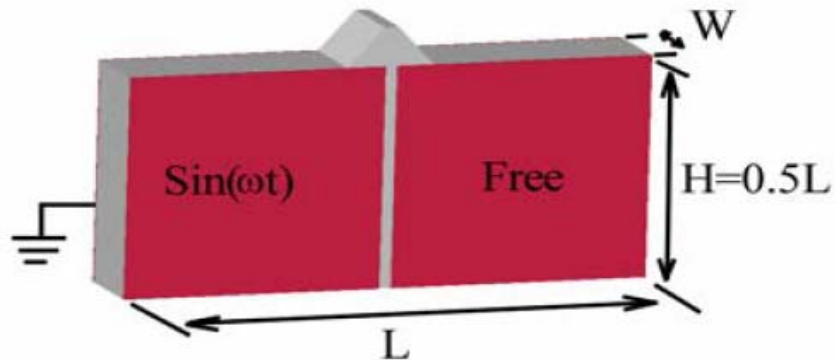


1.17 pav. Suspaudimo tipo pjezoelektrinio variklio veikimo principas.

Judesys gaunamas trijų pjezoelektrinių pavarų pagalba. Dvi išorinės pavaros (1 ir 3) gali užspausti slankiklį arba gali būti aktyvintos nepriklausomai viena nuo kitos. Centrinė pjezoelektrinė pavara (2) yra naudojama, kad keistų atstumą tarp dviejų išorinių pavarų, ji pailgėdama padidina atstumą tarp pavarų 1 ir 3.

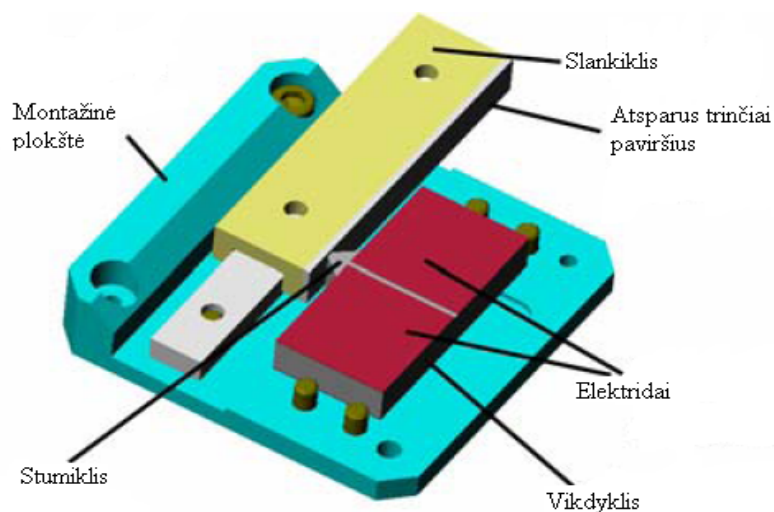
1.8.3. Linijinė, ultragarsinė pjezoelektrinė pavana

Pjezoelektrinėse pavarose labai svarbu yra pjezo elemento matmenys. Pjezoelemento aukštis turi būti nedidesnis negu pusė pjezoelemento ilgio (1.18 pav.) [14].



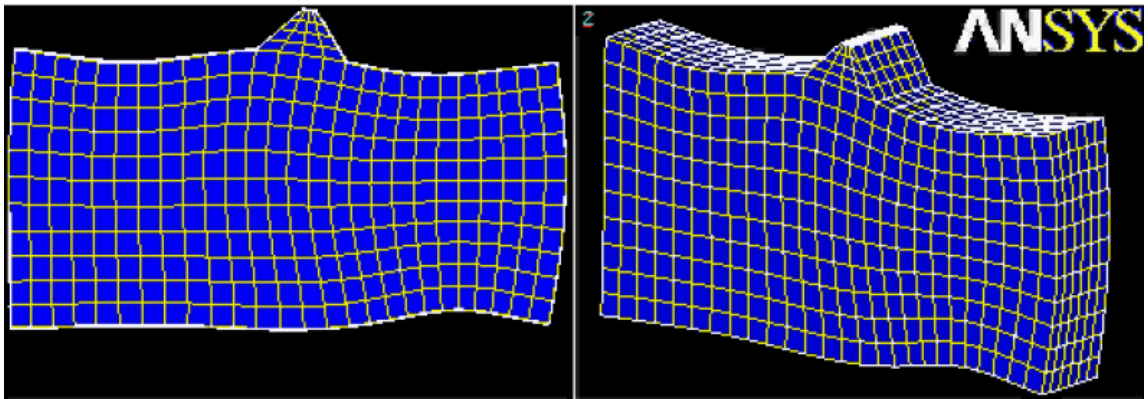
1.18 pav. Pjezoelemento dydis

Linijinės pjezoelektrinės pavaros (1.19 pav.) prikyje yra du sužadavimo elektrodai. Pavaros valdymas yra gaunamas įjungus sinusinės bangos įtampą į vieną iš elektrodų.



1.19 pav. Linijinė pjezoelektrinė pavana

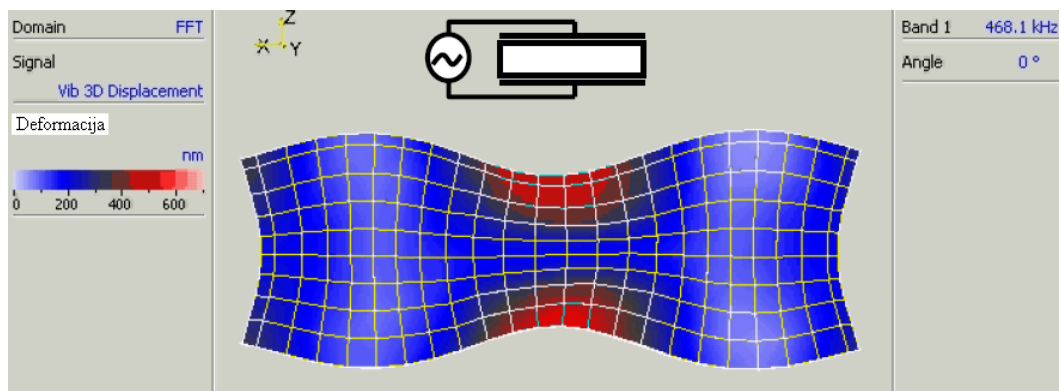
Labai svarbus tokio tipo pjezoelemento veikimo procesas [14]. Todėl buvo padarytas baigtinių elementų metodu kompiuterinis pjezoelemento veikimo procesas (1.20 pav.). Pjezoelementui veikiant, stumiklis, esantis pjezoelemento viršuje, daro kreivalinijinį judesį.



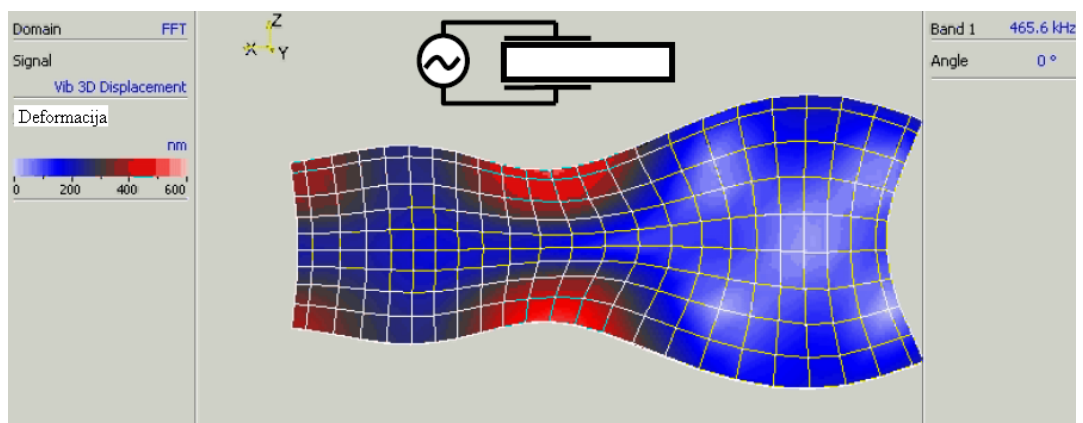
1.20 pav. Baiginių elementų metodu suprojektuotos pjezoelemento deformacijos

1.8.3.1. Pjezoelemento matavimas trimačiu lazeriniu vibrometru

Matavimas atliktas bekantakčiu, trimačiu lazeriniu vibrometru, kuris vienu metu matuoja visus tris pjezoelemento judėjimo vektorius [14]. Tokie matavimai buvo atlikti tam, kad išsiaiškinti, kiek ir kokios pjezoelemento zonos deformuojasi prijungus įtampą. Matavimai atlikti simetriškai (1.21 pav.) ir asimetriškai (1.22 pav.) žadinant pjezoelementą.



1.21 pav. Simetrinis pjezoelemento žadinimas



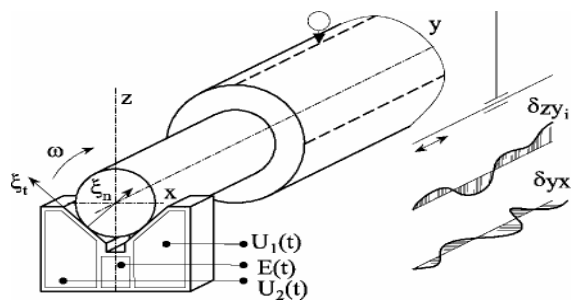
1.22 pav. Asimetrinis pjezoelemento žadinimas

1.9. Aktyvios atramos

1.9.1. Aktyvieji pjezoelektriniai elementai

Aktyvieji pjezoelektriniai elementai gali būti įmontuojami į staklių arba mašinos bazines konstrukcijas, kurios užtikrina geometrinius tikslumo parametrus, t. y. į koordinatinių judesių kreipiamąsias, pinolių ir suklių guolių atramas, taip pat ir į galutinę kinematinę grandį – pjovimo įrankio laikiklį arba matavimo galvutės konstrukciją. Vienas iš atvejų velenų arba suklių padėčiai koreguoti yra parodytas 1.23 pav [15].

Pjezokeraminiai įdėklai įmontuoti į V pavidalo atramas. Įdėklai prijungti prie aukšto dažnio įtampos signalų generatoriaus. Įrenginys pritaikytas suklio geometriniams tikslumo parametrų matuoti – kakliukų cilindriškumui, apskritumui ir kt. Suklio sukimas gaunamas transformuojant aukštojo dažnio rezonansinius virpesius, generuojamus įtampomis $U_1(t)$ ir $U_2(t)$ į nepertraukiamąjį sukimąsi. Šalia suklio su atramomis yra montuojamos tikslios kreipiamosios, naudojamos matavimo keitikliams tvirtinti. Keičiant maitinimo dažnį arba srovę ($\sim 0,5-1,0$ A), suklio sukimasis gali būti reguliuojamas nuo 0,5 aps./min iki 10 aps./min. Matuojamųjų suklių masė - nuo 5 iki 10 kg.



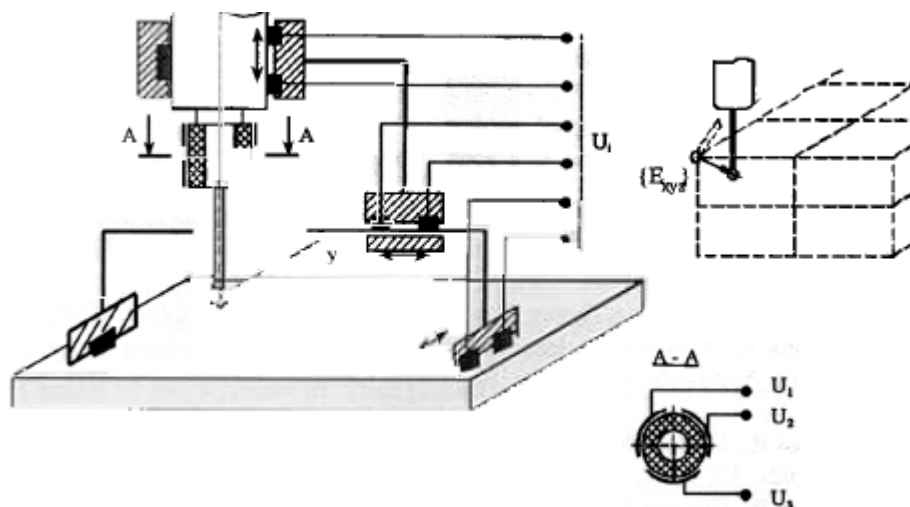
1.23 pav. Precizinių staklių matavimo stendas su pjezoelektrike pavara.

1.9.2. Suminis pjezoelektrinis koregavimas

Šiuolaikinės metalo pjovimo staklės ir kiti technologiniai įrengimai kai kada yra naudojami ir kontrolės operacijoms, technologinių įrankių pakeičiant matavimo įrankiu arba keitikliu.

Suminis pjezoelektrinis staklių ir mašinų dalių padėties ir poslinkio koregavimas yra aprašytas darbuose [15-16]. Tam tikslui į mašinos konstrukcinius elementus įmontuojamos pjezokeramikos plokštelės, cilindrai arba stačiakampiai įdėklai. Prijungus prie šių elementų maitinimą dėl atvirkštinio pjezoefekto yra sukeliamas deformacija, kuri mikrometriniais dydžiais pastumia mašinos dalį reikiama kryptimi ir reikiamu dydžiu. Prieš tai atliekama koordinatinio pozicionavimo paklaidų analizė, ją susiejant su staklių geometrinių parametrų paklaidomis. Nustatomas erdvinis staklių paklaidų vektorius $\bar{F}(\xi) = f(x, y, z, \psi_\Sigma)$, čia x, y, z - koordinatinės staklių dalių poslinkio paklaidos, ψ_Σ - geometrinė staklių judančiosios dalies poslinkio paklaidų suma. Paklaidas aproksimuojant

supaprastintomis trigonometrinėmis funkcijomis, randami būdingieji koregavimo taškai, ir staklių judančių dalių padėtis koreguojama. Koregavimo pavyzdys yra pateiktas 1.24 pav.

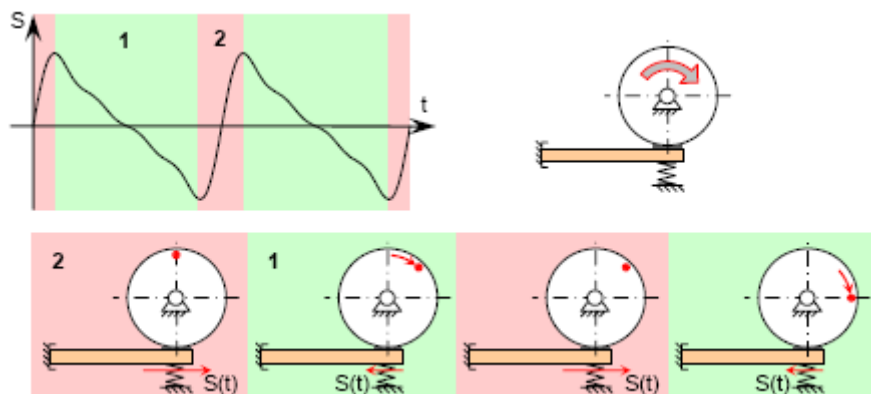


1.24 pav. Sinusinis koregavimas, mašinos konstrukcijoje taikant aktyviuosius elementus.

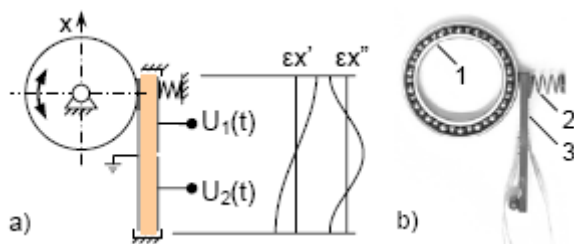
1.10. Neharmoniniai virpesiai

1.10.1. Neharmoniniai rezonansiniai virpesiai pjezoelektriniuose varikliuose

Neharmoninių virpesių variklio veikimas yra pagrįstas trinties ir inercijos jėgų santykio kitimu variklio trinties poroje, dėl neharmoninių (pjūklo formos) virpesių varančiojoje grandyje (1.25 pav.) [17]. Palyginti lėtos varančiosios grandies 1 judesio metu inercijos jėga variklio trinties poroje yra mažesnė už trinties jėgą, todėl varančioji grandis varo išėjimo grandį. Palyginti greito varančiosios grandies judesio 2 metu trinties jėga yra mažesnė už inercijos jėgą, todėl varančioji grandis ir išėjimo grandys praslysta viena kitos atžvilgiu. Gaunamas vidutiniškai vienkryptis išėjimo grandies judesys. Variklio išėjimo grandis reversuoja, kai pakeičiama žadinimo signalo kryptis (1.27 pav., b).



1.25 pav. Neharmoninių virpesių variklio veikimo principas (S grandies poslinkis)

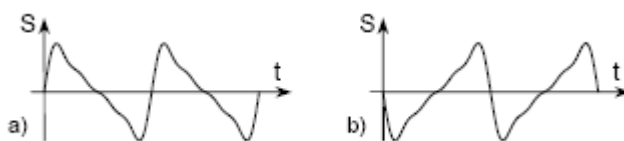


1.26 pav. Neharmoninių rezonansinių virpesių pjezoelektrinio variklio schema (a) ir maketas (b): 1 - riedėjimo guolis, 2 - prispaudimo spyruoklė, 3 - pjezokeraminė įėjimo grandis

Visi žinomi eksperimentiniai ir komerciniai neharmoninių virpesių varikliai veikia nerezonansiniu režimu. Variklių efektyvumui padidinti siūlomas naujas pjezokeraminių įėjimo grandžių rezonansinio žadinimo metodas. Šiuo atveju pjezokeraminė įėjimo grandis generuoja neharmoninius pjūklo formos virpesius, sumuodama keletą rezonansinių virpesių harmonikų. Iš Furjė teorijos yra žinoma, kad pjūklo formos virpesys susideda iš daugelio harmonikų (1.27 pav.):

$$x(t) = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \frac{2A}{k} \sin(k\omega t) \quad (1.24)$$

čia ω - pirmosios harmonikos dažnis, n - harmonikų skaičius.

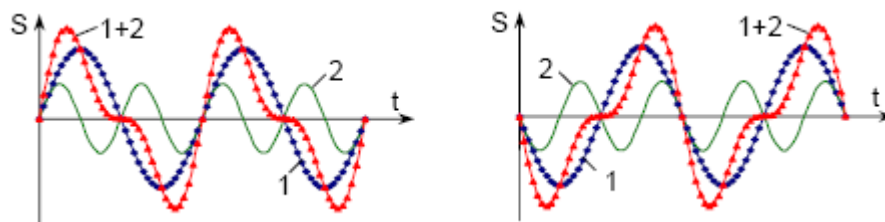


1.27 pav. Pjūklo formos virpesys, susidedantis iš penkių harmonikų, kai signalai yra priešingų kryptų (a) ir (b)

Rotorinio variklio varančiosios grandies žadinimo schemai supaprastinti (1.25 pav.) buvo pasirinktos tik dvi pirmosios išilginių rezonansinių virpesių harmonikos (1.27 pav.)

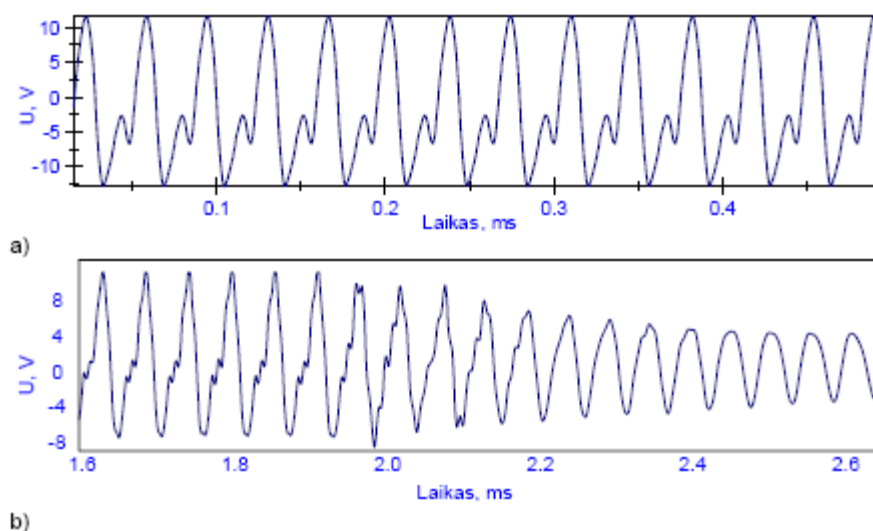
$$x(t) = 2A \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) \quad (1.25)$$

Pjezokeraminė įėjimo grandis (1.26 pav.) turi dvi elektrodų poras, kuriomis žadinamos pirmosios dvi išilginių virpesių savosios formos. Variklio išėjimo grandis reversuojama, perstūmus antrojo signalo fazę 180 laipsnių arba pirmojo signalo fazę 90 laipsnių vienas kito atžvilgiu (1.28 pav.). Pirminiai eksperimentai buvo atlikti su pjezokeramine įėjimo grandimi (60x3x3 mm) (1.26 pav., b), kurios išilginių virpesių savieji dažniai yra 28 kHz ir 56 kHz. Pradiniai eksperimentai įrodė, kad toks variklis veikia, ir paskatino tęsti jo tyrimus.



1.28 pav. Teorinis neharmoninis virpesys, susidedantis iš dviejų harmonikų: 1 – pirmoji harmonika, 2 – antroji harmonika, $1+2$ – signalas, gautas susumavus pirmąją ir antrąją harmonikas

Norint supaprastinti įėjimo grandies konstrukciją ir valdymo schemą, ją galima žadinti vienu pjūklo formos elektriniu signalu ir taip sužadinti visas atitinkamas išilginių virpesių savąsias formas (1.29 pav.). Bet ir šiuo atveju įėjimo grandžiai reikalingos ne mažiau kaip dvi elektrodų poros. Tačiau, taikant tokį žadinimo metodą, iškyla problemų dėl aukštesniųjų harmonikų amplitudžių ir fazių valdymo.



1.29 pav. Dviem sinchronizuotais harmoniniais elektriniais signalais (a) ir vienu pjūklo formos signalu (b) (išjungus elektrinį signalą matomas pereinamas procesas) žadinamos pjezokeraminės įėjimo grandies virpesiai

Didžiausias tokios įėjimo grandies pranašumas yra tas, kad jai nėra griežtų matmenų ar kontakto ploto apribojimų, įėjimo grandis gali būti labai mažo skerspjūvio (kaip adata), o našumas priklauso tik nuo jos ilgio. Dėl šių savybių ji geriausiai tinka didelės skyros ypač mažų matmenų pavaroms, pavyzdžiui, matriciniams Brailio manipulatoriams, kurių atstumas tarp adatų ašių yra apie 2,5 mm

1.10.2. Įėjimo grandies išilginių virpesių savieji dažniai ir jų valdymo galimybės

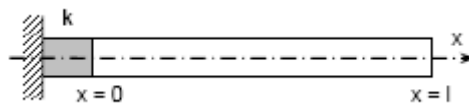
Kad būtų galima greitai apskaičiuoti pjezokeraminės įėjimo grandies išilginių virpesių savuosius dažnius ir įvertinti jų pokytį, esant skirtingoms jos tvirtinimo variklyje sąlygoms, buvo sprendžiama pastovaus skerspjūvio vienalyčio strypo išilginių virpesių diferencialinė lygtis, parenkant skirtingas kraštines sąlygas [17]:

$$\rho S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \left[ES(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho} F(x, t) \quad (1.26)$$

Čia ρ - tankis; S , x , u - skerspjūvio plotas, koordinatė ir poslinkis; E - tamprumo modulis; F - jėga.

Buvo gautos laisvo, gembiškai įvirtinto strypo, gembiškai per tarpinį tamprųjį elementą įvirtinto strypo ir strypo su pridėtine mase pirmosios išilginių virpesių formos mazgų savųjų dažnių išraiškos bei sprendiniai.

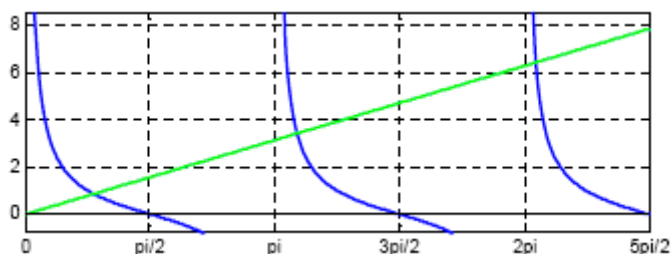
Iš gembiškai per tarpinį tamprųjį elementą įvirtinto strypo (1.30 pav.) savųjų dažnių išraiškos (1.27 lygtis) bei jos sprendinio (1.20 pav.) buvo nustatyta, kad toks tvirtinimas turės didesnę įtaką pirmajam savajam dažniui ir leis kompensuoti teigiamą $\omega_2 - 2\omega_1$ savųjų dažnių skirtumą.



1.30 pav. Pastovaus skerspjūvio ploto gembiškai per tarpinį elementą įvirtinto strypo modelis

$$\alpha\beta = \operatorname{ctg}\beta, \quad (1.27)$$

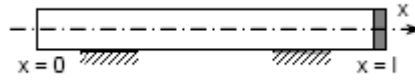
čia $a = E/E_k$; $p = \rho l/c$; l - strypo ilgis; a - savasis dažnis; E , E_k - strypo ir tarpinio elemento tamprumo moduliai; c - virpesių sklaidimo strype greitis.



1.31 pav. Grafinis lygties sprendimas

Iš laisvo pastovaus skerspjūvio ploto strypo su pridėtine mase viename jo gale (1.32 pav.) išilginių virpesių savųjų dažnių išraiškos (1.28 lygtis) bei jos sprendinio (1.33 pav.) buvo nustatyta, kad toks tvirtinimas turės didesnę įtaką antrajam savajam dažniui ir leis kompensuoti gembinio

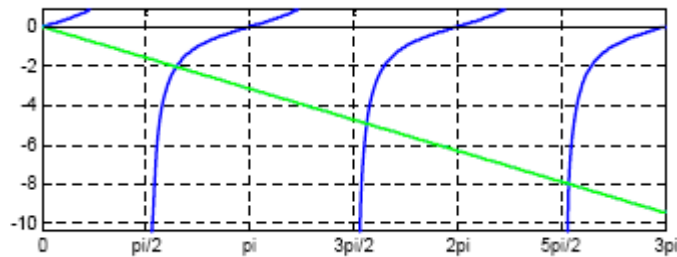
tvirtinimo įtaką saviesiems dažniams arba neigiamą savųjų dažnių skirtumą $\omega_2 - 2\omega_1$. Gauti rezultatai buvo patvirtinti eksperimentiniais matavimais.



1.32 pav. Laisvo pastovaus skerspjūvio ploto strypo su pridėtine mase viename jo gale modelis

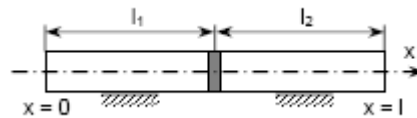
$$\operatorname{tg} \beta = -\alpha \beta, \quad (1.28)$$

čia $\alpha = M/m$; $\beta = col/c$; l - strypo ilgis; ω - savasis dažnis; M, m - pridėtoji ir strypo masės; c - virpesių sklaidimo strype greitis.



1.33 pav. Grafinis (1.28) lygties sprendimas

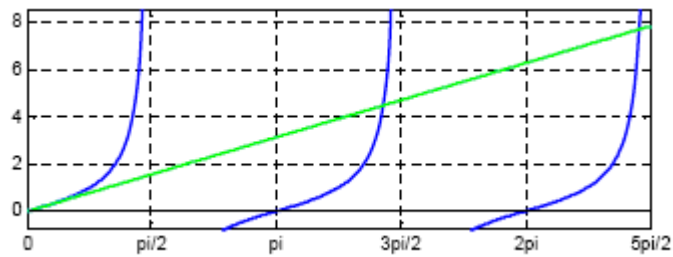
Iš laisvo strypo su pridėtine mase pirmosios išilginių virpesių formos mazge (1.34 pav.) savųjų dažnių išraiškos (1.29 lygtis) bei jos sprendinio, kai $M \ll m$ ir $M \gg m$ (1.35 pav.), nustatyta, kad buvo gautas tarpinis sprendinys tarp laisvo ir gembiskai įtvirtinto strypo sprendinių. Todėl, keičiant koncentruotos pridėtinės masės dydį, kinta abu savieji dažniai, o kai $M \gg m$, gaunami du gembiniai strypai, kurie neatitinka tiriamojo strypo kaip vientiso kūno. Todėl tolesniuose tyrimuose buvo taikomas baigtinių elementų skaičiavimo metodas.



1.34 pav. Laisvo strypo su pridėtine mase pirmosios išilginių virpesių formos mazge modelis

$$\frac{S_1}{S_2} \operatorname{tg} \frac{wl_1}{c} = \frac{Mwc}{ES_1}, \quad (1.29)$$

čia S_1, S_2, l_1, l_2 – pirmosios ir antrosios strypo dalies skerspjūvių plotai ir ilgiai; ω – savasis dažnis; E – tamprumo modulis; c – virpesių sklaidimo strype greitis; M – pridėtoji masė.



1.35 pav. Grafinis (1.29) lygties sprendimas

1.11. Fotoelektrinis kampo keitiklis

Precizinės apskritiminės skalės yra montuojamos į fotoelektrinius kampų matavimo keitiklius.

[1] 1.36 pav



1.36 pav. Fotoelektrinis kampo keitiklis

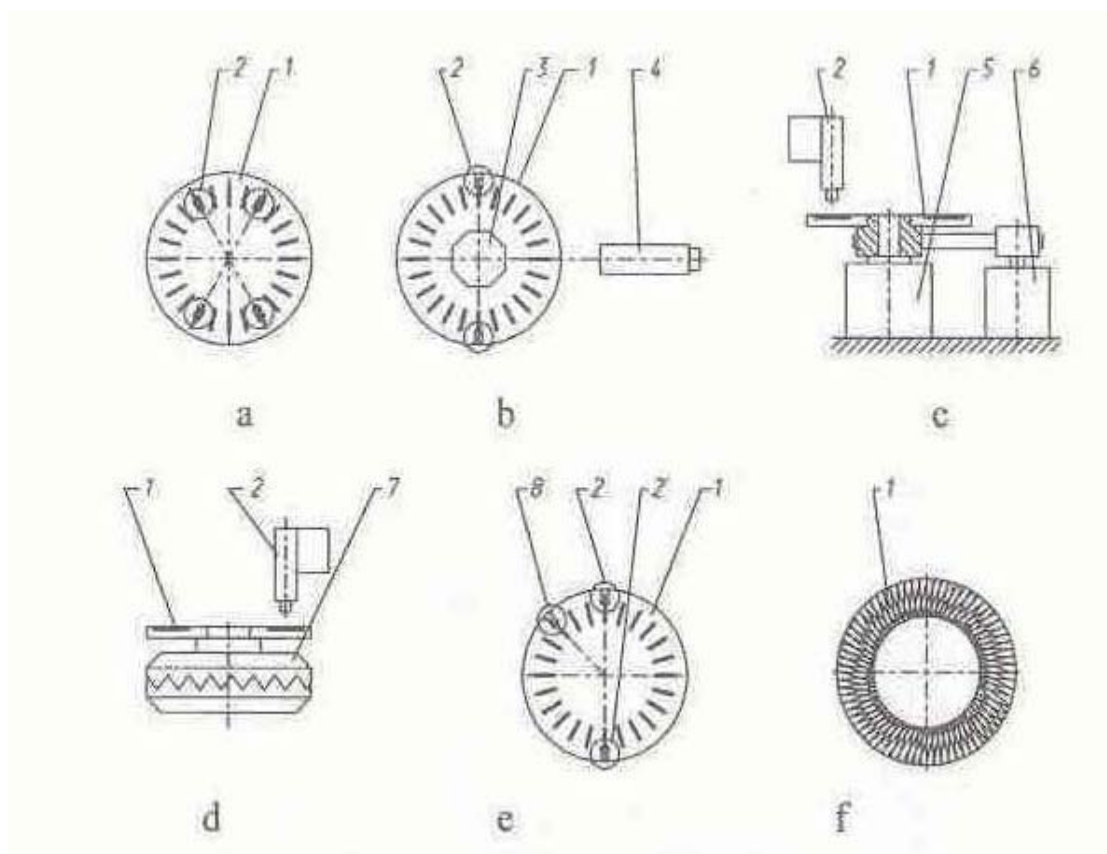
Kampo keitikliai yra naudojami metalo pjovimo staklių sukamųjų staklių pasukimo kampams matuoti ir valdyti, matavimo prietaisų kampų atskaitymo ir matavimo sistemose, pramoninių robotų kampinių dydžių matavimo ir valdymo sistemose. Robototeknikoje yra itin reikalingas didelis informacijos kiekis apie atliekamą judesį, todėl yra duomenų apie kampo keitilį, duodančio 100000 impulsų vieno apsisukimo metu, naudojamą roboto griebtuvo konstrukcijoje.

Naudojamų pramonėje kampo keitiklių impulsų vieno apsisukimo metu skaičius būna tokių dydžių: 100; 250; 500; 600; 1024; 1500; 2000; 2500; 5000; 25000; 32400 ir kt. Generuojamų impulsų skaičius būna dvejetainės, dešimtainės bei šešetainės laipsnių sistemose.

Toliau pateiktos kai kurios matavimų technikoje naudojamos kampų matavimo schemas (1.38 pav.).

Bendrieji elementai, kurie yra būdingi kiekvienam iš schemoje nurodytų matavimų, yra šie:

- . matuojamasis objektas - kampu sukamas objektas, limbas arba apskritimine skalės;
- . pamatinis etalonas;
- . atskaitos priemonė arba prietaisas;
- . sukimo pavara.



1.37 pav. Didelio tikslumo kampų matavimo shemos: 1 – matuojamasis limbas, 2 – mikroskopas, 3 – daugiakampė prizmė, 4 – autokolimatorius, 5 – kampo keitiklis, 6 – pavara, 7 – kampų matavimo prietaisas, 8 – papildomas mikroskopas; a – matavimas kalibruojant pasirinkto pastovaus kampo vertę visame apskritime, b – matavimas daugiakampe prizme ir autokolimatoriumi, c – matavimas stabilaus matuojamosios skalės sukimo metu, d – matavimas naudojant didelio tikslumo kampų matavimo prietaisą, e – matavimas padalų simetrijos (pusės apskritimo) būdu, f – matavimas muariniu būdu.

Matuojamieji objektai, be skalių ir limbų, gali būti staklių pasukamieji stalai ir dalijimo galvutės, apskritiminių skalių gamybos įrenginiai, kiti kampų matavimo prietaisai. Schemoje parodyta, jog kaip pamatiniai etalonai yra naudojamos kitos didelio tikslumo apskritiminės skalės ir limbai. Be to, kaip pamatinis etalonas gali būti naudojamas pastovus kampas, sudaromas atskaitos priemonėmis matavimo metu. Šiuo kampu skalė yra kalibruojama pilname apskritime, kaip tokie

etalonai naudojami ir didelio tikslumo kampo keitikliai bei kampų matavimo prietaisai. Specialų pamatinį etaloną sudaro stabiliai sukama pavara ir generuojami etaloniniai laiko intervalai, kurių atžvilgiu yra registruojami impulsai, gaunami nuo apskritiminės skalės brūkšnių, praslenkančių po nejudamu atskaitos prietaisu (fotoelektriniu mikroskopu). Tuo atveju padalų tikslumas yra nustatomas pagal impulsų pasirodymo tolygumą laiko skalėje, įvertinant sukimosi pokyčius.

2. LITERATŪROS APŽVALGOS APIBENDRINIMAS

Atlikus literatūros apžvalgą buvo pastebėta, kad 1.23 paveiksle pavaizduota pavara yra sudėtingos konstrukcijos, nes pjezo keramika yra išpjauta „V” forma, o tai padaryti sudėtinga, žinant pjezo keramikos savybes – kieta, bet trapi. 1.26 paveiksle pavaizduota pavara yra paprasta ir nesunkiai pagaminama, todėl tokia konstrukcija yra prieinamiausia baigiamajam darbui.

Apžvelgus pjezo pavaros valdymą 1.10.1. skyriuje, manau, kad paduodamas pjuklo formos signalas į pjezo keramiką yra efektyvus, bet jam gauti reikia sudėtingesnės elektroninės aparatūros. Paprasčiau pjezo elementą įvesti į rezonansą, į jį paduodant sinuso formos aukšto dažnio įtampą. Tokį signalą išduoda dažnių generatoriai, esant reikalui, tokį signalą galima sustiprinti, panaudojant stiprintuvą. Todėl pjezo elemento valdymas tokiu būdu yra paprastesnis ir lengvesnis.

Išanalizavus 1.11 skyrių, patogiausia pjezo pavaros pasisukimo įvertinimą atlikti fotoelektriniu kampų matavimo keitikliu.

3. TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti pjezoelektrinę pavarą, kuri galėtų būti taikytina kampiniam poizicioinavimui.

Uždaviniai:

- 1) sukurti pjezoelektrinę sukimo pavarą, taikytiną pozicionavimo staliukui;
- 2) nustatyti sukurtos pjezoelektinės pavaros pozicionavimo tikslumą.

4. DARBO ATLIKOMO METODIKA

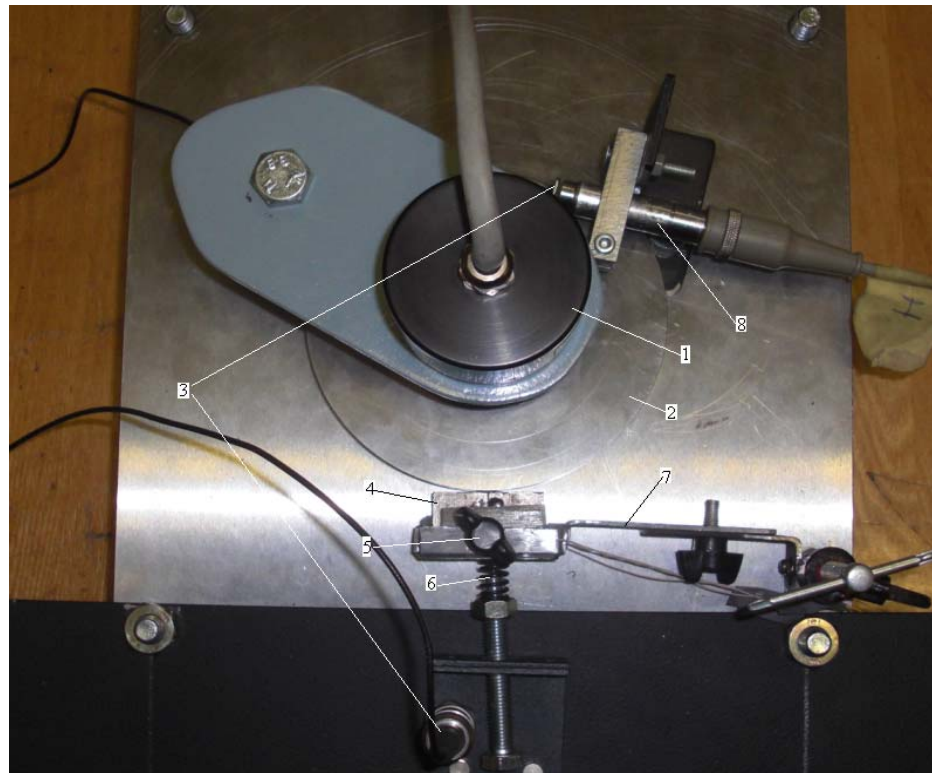
Darbas atliktas naudojant teorinius ir eksperimentinius tyrimų metodus. Remiantis teoriniais skaičiavimais, paskaičiuotas sukamojo disko linijinis poslinkis ir pjezo elemento veikimo trukmė vieno impulso metu. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Staklių tyrimo laboratorijoje, VGTU Mechanikos fakultete.

Fotoelektriniu kampo keitikliu tirta disko pasisukimas ir jo pozicionavimo tikslumas. Remiantis pagreičio jutiklių išmatuotais signalais, buvo nustatyti sistemos virpesiai pasukimo proceso metu ir pjezoelemento veikimo trukmė.

5. PJEZOELEKTRINĖ PAVARA, JOS VALDYMO IR REGISTRAVIMO SIGNALŲ PRIETAISAI

5.1. Tyrimo stendas

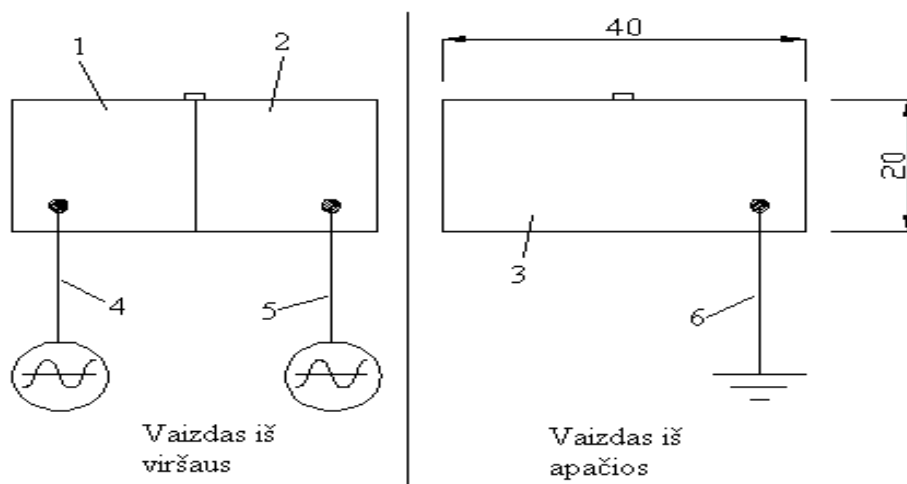
Remiantis literatūra, suprojektuotas ir pagamintas radialinis pjezoelektrinės pavaros tyrimo stendas (5.1 pav.). Jį sudaro: plieninis diskas, kurio lietimosi su pjezo elementu paviršius nušlifuotas iki 0,01 mm mušimo, ir jis sumontuotas ant guolio. Prie disko, per spyruoklę prispaustas pjezoelementas.



5.1 pav. Tiriamasis stendas: 1 – fotoelektrinis kampo keitiklis; 2 – sukamas diskas; 3 – pagreičio jutikliai; 4 – pjezoelementas; 5 – varžtas, reguliuojantis pjezoelemento prispaudimą; 6 – prispaudimo spyruoklė; 7 – svirtis leidžianti stumdyti pjezoelementą į kairę, į dešinę, į priekį ir atgal; 8 – poslinkio jutiklis

5.2. Pjezo elementas

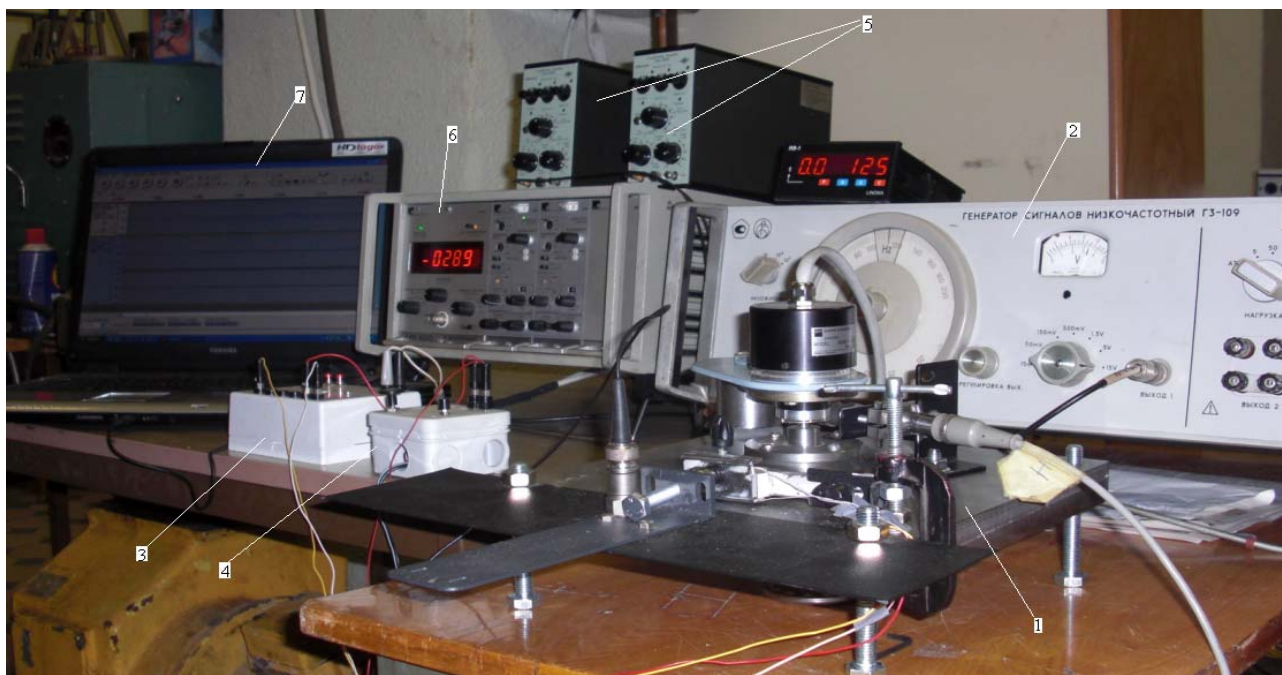
Tyrinėjant pjezoelementą (5.2 pav.), buvo ieškomas dažnis, prie kurio pjezo elementas pradeda virpėti, ir įtampa, kuri reikalinga, kad pjezoelementas virpėtų. Pradžioje buvo nustatyta 100 voltų įtampa ir keičiant dažnių generatoriaus išeinantį dažnį, buvo ieškomas rezonansinis dažnis nuo 18 Hz iki 200 kHz, tačiau prie tokios įtampos jokių virpesių nepastebėta. Vėliau buvo atlikti bandymai su 200 voltų įtampa ir nustatytas 108 kHz pjezoelemento rezonansinis dažnis. Buvo nuspręsta didinti įtampą ir pažiūrėti kokia įtaką turės disko sukimuisi. Didinant įtampą iki 240 voltų, disko sukimosi greitis didėjo, o padidinus įtampą virš 240 voltų jokios įtakios disko sukimuisi neturėjo, tai tik padidino pjezo elemento temperatūrą. Buvo nustatyta, kad 240 voltų tai efektyviausia įtampa, prie kurios pasireiškė geriausios pjezoelemento kaip pavarosavybės. Tolimesni bandymai parodė, kad mažinant įtampą galima koreguoti elemento virpėjimą ir disko sukimosi greitį.



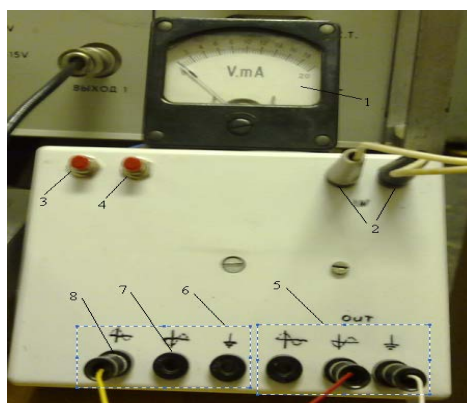
5.2 pav. Pjezo elementas: 1, 2, 3 – elektrodai; 4, 5 – „+“ laidas; 6 – „-“ laidas

Pjezo elemento viršutinis elektrodas yra padalintas į dvi dalis (5.2 pav., 1 ir 2). Šito reikia tam, kad gauti judesį į abi puses. Įjungus įtampą į 4 ir 6 laidus, pjezo elementas virpės taip, kad diskas suksis iš dešinės į kairę, o jeigu įtampa bus įjungta prie 5 ir 6 laidų, diskas suksis iš kairės į dešinę.

5.3. Tyrimo stendas ir prietaisai

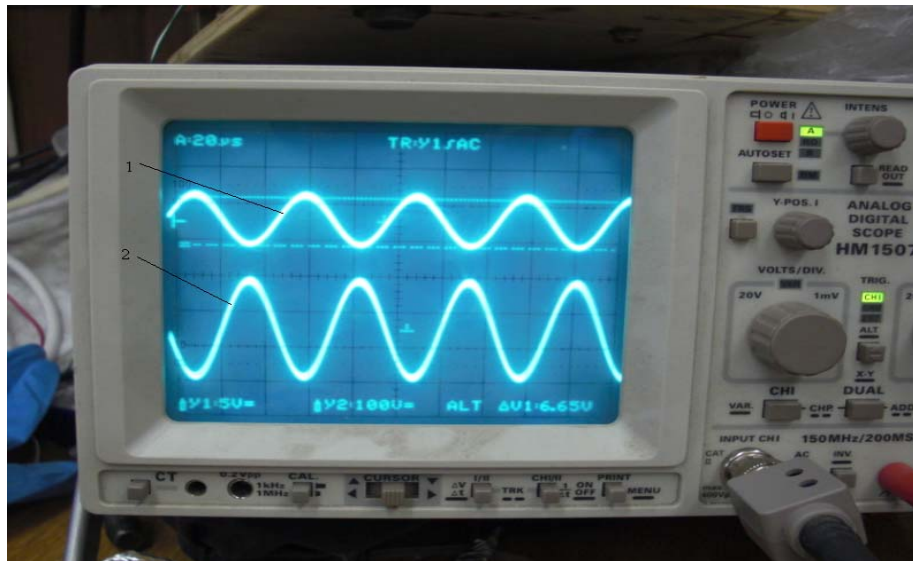


5.3 pav. Tiriamasis stendas ir jo valdymo, bei duomenų nuskaitymo prietaisai: 1 – tiriamasis stendas; 2 – žemadažnių signalų generatorius ГЗ-109 (išėjime dažnis nuo 17,7 Hz iki 200 kHz ir įtampa nuo 15 mV iki 15 V); 3 – įtampos stiprintuvas; 4 – stačiakampio impulso formavimo įrenginys; 5 – signalų stiprintuvai; 6 – bekontaktio poslinkio jutiklio stiprintuvas, 7 – kompiuteris

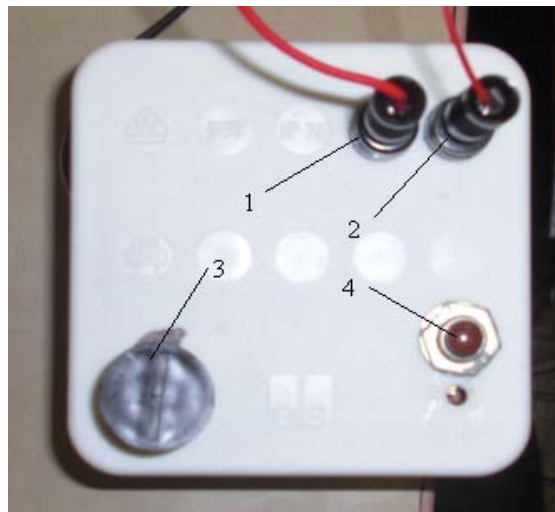


5.4 pav. Transformatorius: 1 – voltmetro; 2 – signalo įėjimas; 3 – išėjimą valdantis mygtukas; 4 – išėjimą valdantis mygtukas, 5 – 1 išėjimas; 6 – 2 išėjimas; 7 – išėjimas, kurį valdo 4 mygtukas; 8 – išėjimas, kurį valdo 3 mygtukas

Iš žemadažnio generatorius išeinantis signalas buvo paduodamas į transformatorių (5.4 pav.), kurio išėjime yra sustiprinamas 20 kartų (5.5 pav.). Voltmetras matuoja iš transformatoriaus išeinančią įtampą, skalės rodmenys yra 1 : 20.



5.5 pav. Oscilografu matuota įtampa: 1 – įtampa, išeinanti iš dažnių generatoriaus; 2 – įtampa, išeinanti iš generatoriaus



5.6 pav. Stačiakampių impulsų formavimo įrenginys: 1 – įėjimas; 2 – išėjimas; 3 – rankenėlė, kuria sukant galima didinti arba mažinti stačiakampio impulso plotį (laiką); 4 – mygtukas



5.7 pav. „Precizika Metrology“ fotoelektrinis kampų keitiklis A58-F



5.8 pav. Fotoelektrinio kampų keitiklio impulsų registratorius LINOMA RB-1

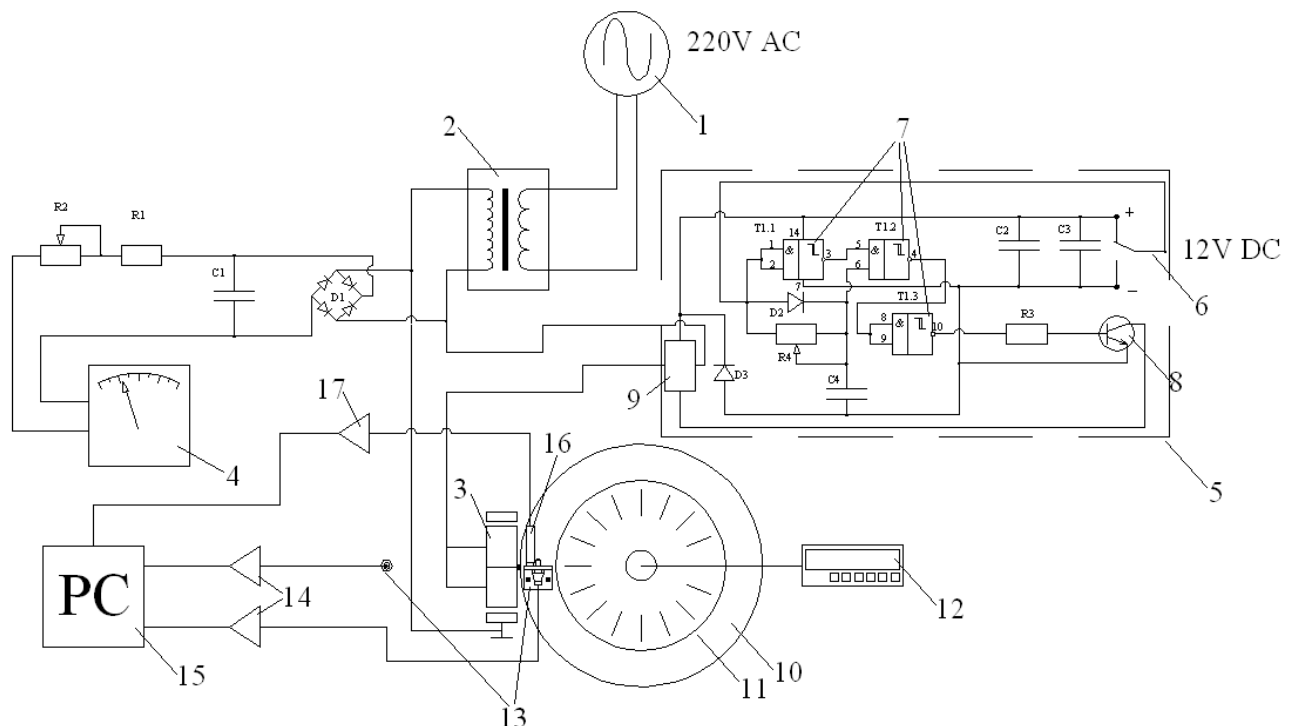


5.9 pav. „Brüel & Kjær“ pagreičio jutiklių (akselerometrų) stiprintuvai 2626



5.10 pav. Bekontakčio poslinkio jutiklio stiprintuvas KWS 503D

5.4. Tiriamos sistemos struktūrinė schema



5.11 pav. Tiriamos sistemos struktūrinė schema: 1 – dažnių generatorius; 2 – feritinis transformatorius (pirminės apvijos vijų skaičius 20, antros apvijos vijų skaičius 200); 3 – pjezoelementas; 4 – voltmetas; sukamasis metalinis diskas; 5 – stačiakampių impulsų formavimo įrenginys; 6 – mygtukas; 7 – mikroshema (K561TJ1, kurioje yra keturi 2 IR – NE elementai, iš kurių 3 yra panaudoti – tai T1.1, T1.2, T1.3); 8 – tranzistorius (KT972A); 9 – relė (РЭС 10); 10 – sukamasis diskas; 11 – fotoelektrinis kampo keitiklis (A58 – F); 12 – fotoelektrinio kampo keitiklio nuskaitymo įrenginys; 13 – pagreičio jutikliai („Brüel & Kjær“); 14 – stiprintuvai; 15 – kompiuteris; 16 – poslinkio jutiklis; 17 – bekontakčio poslinkio jutiklio stiprintuvas KWS 503D; C1 – kondensatorius (300 μ F, 400 V); C2 – kondensatorius (1000 μ F, 50V); C3 – kondensatorius (0,1 μ F); C4 – kondensatorius (0,01 μ F); R1 – varža (1,5 M Ω); R2 – reguliuojama varža (330 k Ω); R3 – varža (100 k Ω); R4 – reguliuojama varža (1,5 M Ω); D1 – diodų tiltas (K14 407); D2 ir D3 – diodai (K1522Б)

Pagal tiriamąjį standą ir jo valdymo bei duomenų nuskaitymo prietaisus (5.3 pav.) buvo sukurta tiriamos sistemos struktūrinė schema (6.11 pav.)

Pjezoelemento virpesiams sužadinti buvo naudojamas dažnių generatorius (1) (5.11 pav.). Tačiau generatoriaus išėjime suformuota signalo įtampa pernelyg žema (tik 15 V), todėl buvo panaudotas transformatorius (2) (5.4 pav.), kuris sustiprintų įtampą. Tam panaudotas feritinis transformatorius [18], nes jis sustiprina įtampą neiškraipydamas dažnio generatoriaus perduodamą dažnį. Transformatoriaus pirminis vijų skaičius 20, o antrinės 200. Apskaičiavus vijų santykį ir

patyrinėjus oscilografu, įtampa transformatoriaus išėjime sustiprinama 20 kartų. Transformatoriaus (2) išėjimo minusinis („- laidas“) tiesiai jungiamas su pjezoelementu (3) (5.2 pav.), o pliusinis laidas („+“) įjungiamas į stačiakampių impulsų formavimo įrenginį (5) (5.11 pav.). Šitas įrenginys buvo sukurtas tam, kad būtų galima valdyti pjezoelementą (3). Stačiakampių impulsų formavimo įrenginys buvo pagamintas ant KMOP tipo mikroschemos (7) [19]. Šioje mikroschemoje yra keturi 2 IR/NE, kurie padėjo lengviau valdyti pjezoelementą. Nuspaudus mygtuką (6), mikroschema (7) pradeda veikti ir atidaro tranzistorių (8), kuris įjungia relę (9), ir iš transformatoriaus (2) išeinantis laidas „+“ yra sujungiamas su pjezoelementu (3). Pjezoelementas pradeda virpėti ir pasuka diską (10). Disko kampinį pasukimą fiksuoja fotoelektrinis kampų keitiklis (11) (5.7 pav.), disko linijinis poslinkis fiksuojamas bekontakčiu poslinkio jutikliu (16), o disko sukimosi laikas yra fiksuojamas pagreičio jutikliais (13). Signalas iš pagreičio jutiklių per stiprintuvus (14) (5.9 pav.) ir signalas iš poslinkio jutiklio per stiprintuvą (17) (5.10 pav.) patenka į kompiuterį (15), kur yra matomas disko linijinis poslinkis, sukimosi laikas ir visas sukimosi procesas.

5.5. Stačiakampių impulsų formavimo įrenginys (5.11 pav., 5 veikimo paaiškinimas)

Pradiniu momentu mygtukas (6) yra įjungtas į įtampos „+“ laidą, ir elemento T1.1 įėjime 1 ir 2 yra „aukštas“ (vieneto) lygis, todėl elemento T1.1 išėjime 3 ir elemento T1.2 įėjime 5 ir 6 yra „žemas“ (nulio) lygis, tokiu būdu išėjime 4 yra „aukštas“ lygis. Elemento T1.3 įėjime 8 ir 9 yra „aukštas“ lygis, tai jo išėjime 10 yra „žemas“ lygis, todėl tranzistorius yra išjungtas ir sistema neveikia.

Kai mygtukas (6) yra įjungtas su įtampos „+“ laidu, kondensatorius C1 labai greitai pasikrauna per diodą D2, todėl atleidus mygtuką, nereikia laukti, kol kondensatorius išsikraus, kad būtų galima suformuoti kitą impulsą.

Kai paspaudžiamas mygtukas (jis persijungia į įtampos „-“ laidą), ir elemento T1.1 įėjime 1 ir 2 atsiranda „žemas“ lygis, o jo išėjime-3 „aukštas“ lygis. Elemento T1.2 įėjime 5 ir 6 „aukštas“, išėjime yra 4 „žemas“ lygis. Elemento T1.3 įėjime 8 ir 9 „žemas“ lygis, o išėjime 10 „aukštas“ lygis. Tada maitinimo įtampa per varžą R3 teka į tranzistoriaus (8) bazę. Tranzistorius yra atidaromas ir per jį tekanti įtampa įjungia relę, kuri priverčia veikti pjezoelektrinę pavarą.

Kai mygtukas paspaudžiamas, kondensatorius C4 pradeda išsikrauti per varžą R1. Schemos veikimo trukmė priklauso nuo kondensatoriaus C4 ir varžos R4 sandaugos τ ($\tau = R \cdot C$).

Kai kondensatorius C4 išsikrauna, elemento T1.2 įėjime 5 yra „aukštas“, o įėjime 6 „žemas“ lygis, tai išėjime 4 yra „aukštas“ lygis. Todėl elemento T1.3 išėjime 10 gaunamas „žemas“ lygis. Tranzistorius užsidaro ir pjezo pavara nustoja virpėti.

6 PJEZO PAVAROS TYRIMAS

6.1. Disko pasukimo tikslumo tyrimas

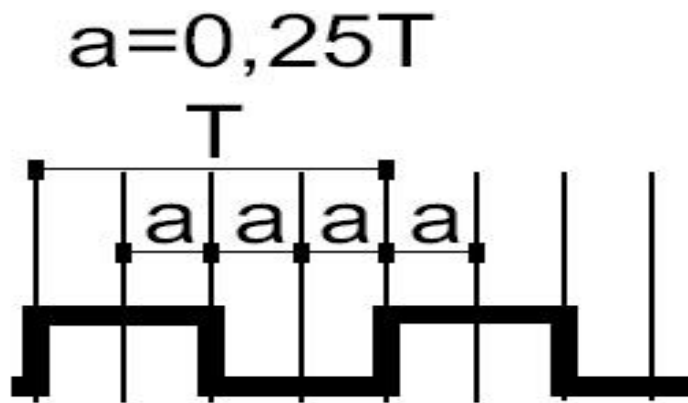
Pjezopavaros pasukimo tikslumui bandyti buvo pasirinktas rankinis būdas (nuspaudžiant stačiakampio impulso formavimo įrenginio mygtuką), t. y. 20 kartų atliekant po 50 paspaudimų, 20 kartų po 100 paspaudimų ir 20 kartų po 200 paspaudimų.

Disko pasisukimui matuoti buvo pasirinktas „Precizika Metrology“ fotoelektrinis kampų keitiklis A58-F. Atliekant bandymus, pasirodė kad, fotoelektrinio kampų keitiklio nuskaitymo įrenginys (5.8 pav.) fiksuodavo mažiau impulsų (6.1 lentelė), negu yra nuspaudžiama. Siekiant išsiaiškinti, ar pjezo elementas visada suveikia, ir ar pasisuka diskas, prie tiriamo stendo buvo prijungti „Brüel & Kjær“ pagreičio jutikliai.

Kiekvieno bandymo metu mygtuko spaudimo procesas buvo užfiksuojamas kompiuterio. Buvo nustatyta, kad keitiklio padalos vertė (6.1 pav., a) yra didesnė, negu disko kampinis poslinkis vieno impulso metu. Fotoelektrinis kampų keitiklis A58-F turi 9000 periodų, o kiekvienas periodas yra dar elektroniškai dalijamas į 4 impulsus, pastaruosius ir rodo keitiklis.

6.1 lentelė. Fotoelektrinio kampų keitiklio užfiksuoti mygtuko paspaudimai

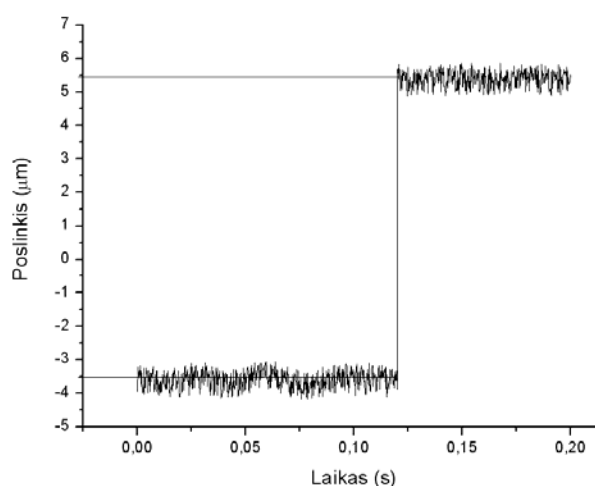
Bandymai	Mygtuko paspaudimai (kartais)		
	50	100	200
	Fotoelektriniu keitikliu išduodamas impulsų skaičius		
1	46	92	188
2	47	86	194
3	47	88	195
4	46	86	190
5	47	86	190
6	49	82	194
7	40	95	190
8	46	89	195
9	45	91	191
10	45	96	195



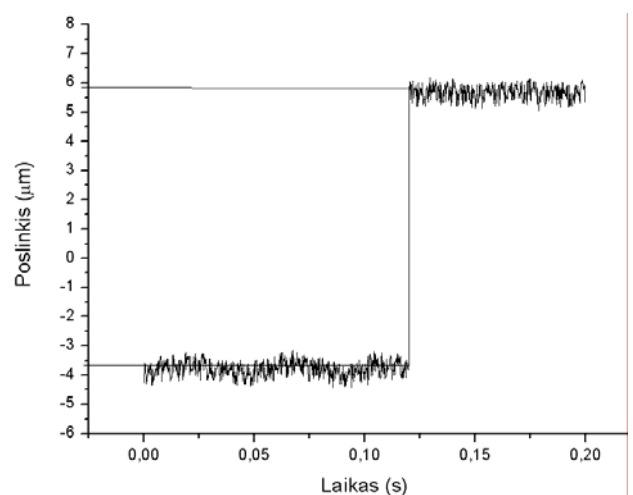
6.1 pav. Fotoelektrinio kampo keitiklio fiksuojamas signalas: a – fotoelektrinio kampo keitiklio nuskaitymo įrenginio fiksuojamas vienas impulsas

Fotoelektrinio kampo keitiklio fiksuojama posūkio mažiausia kampinė vertė yra 36", tai atitiktų disko paviršiaus linijinį poslinkį kontakte su pjezoelementu 10,46 μm , o išmatuotas disko kampinis poslinkis per vieną paspaudimą svyruoja nuo 9,03 μm iki 9,52 μm ir tai sudaro 31" ir 33" disko kampinio poslinkio.

Tikslu patikslinti fotoelektriniu kampų keitikliu gautus rezultatus, prie tiriamojo stendo buvo prijungtas bekontaktis poslinkio jutiklis. Buvo atlikta 10 bandymų ir rezultatai užfiksuoti kompiuterio. Rezultatai buvo apdoroti programa „OriginPro 7.5" ir gauti grafikai (6.2 pav.). Patyrinęjus grafikus buvo nustatyta, kad disko linijinis poslinkis vieno impulso metu svyruoja nuo 9 μm , iki 9,5 μm ir galima daryti išvadą, kad tyrimai atlikti fotoelektriniu kampų keitikliu buvo tikslūs.



a)

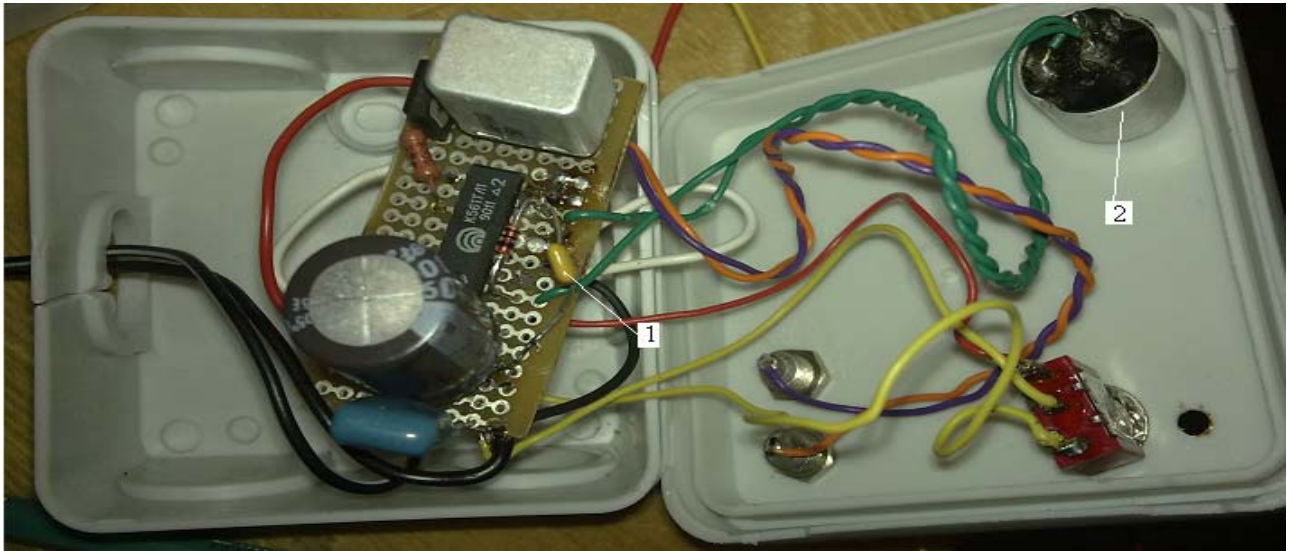


b)

6.2. pav. Disko linijinis poslinkis vieno impulso metu: a – poslinkis 9 μm , b – poslinkis 9,4 μm

6.2. Pjezoelemento suveikimo laikas

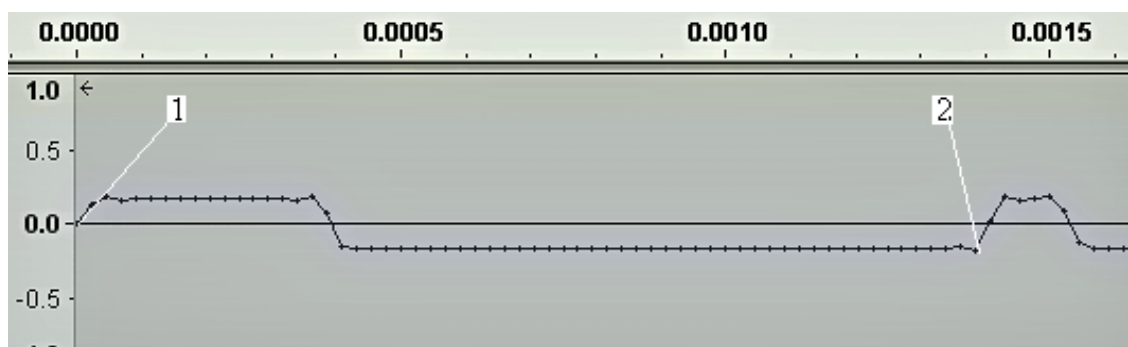
Taip pat apskaičiuotas ir ištirtas pjezoelemento suveikimo laikas. Pjezoelemento veikimo laiką nulemia stačiakampių impulsų formavimo įrenginys (6.3 pav.), t. y. jame esančio kondensatoriaus „C4” išsikrovimas per varžą „R4” (5.11). Tai galima apskaičiuoti pagal formulę (6.1).



6.3 pav. Stačiakampių impulsų formavimo įrenginys: 1 – kondensatorius „C4”, 2 – varža „R4”

$$\tau = R \cdot C = 140\text{k}\Omega \cdot 10\text{nF} = 0.0014\text{ s} \quad (6.1)$$

Atlikus bandymus su pagreičio jutikliais, buvo nustatyta, kad teoriniai laiko skaičiavimai sutampa su laiku, išmatuotu, bandymų metu (6.4 pav.)



6.4. pav. Pjezoelemento veikimas: 1 – pjezoelemento veikimo pradžia; 2 – pjezoelemento veikimo pabaiga

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Atlikti tyrimai parodė, kad keitiklio padalos linijinės išraiškos vertė ant disko yra didesnė negu disko paviršiaus linijinis poslinkis kontakte su pjezoelementu. Disko kampinis poslinkis svyruoja nuo $31''$ ($9,03\mu\text{m}$) iki $33''$ ($9,52\mu\text{m}$). Jis įvykdomas per $0,0014\text{ s}$.

Norint sumažinti pasisukimo diskretą, reikėtų trumpinti pjezoelemento veikimo laiką. Tam reikėtų stačiakampio impulso formavimo įrenginyje atsisakyti analoginio signalo, relės (6.11 pav., 9) ir pakeisti jį skaitmeniniu signalu (elektroniniu raktu), nes daugiau sutrumpinant impulso, trukmę nespėja suveikti relė.

Kitas pasisukimo diskreto sumažinimo būdas būtų, sukimosi disko prijungimas prie precizinės globoidinės slieko-sliekračio pavaros, redukuojančios pjezovariklio įvykdomą poslinkį.

LITERATŪRA

1. Giniotis, V. 2005. Padėties ir poslinkių matavimas. Monografija. Vilnius: Technika.
2. ISO 5725-4:1994 Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results – Part 4: Basic Methods for the Determination of the Trueness of a Standard Measurement Method. Geneva, 1994. 23 p.
3. Trimble. Total Stationas Specifications. Available from Internet:
<<http://www.trimble.com/totalstations.shtml?WT.svl=img3> (viewed 2009-02-04)>
4. Bručas, D. 2008. Development and research of the test bench for the angle calibration of geodetic instruments. Dissertation. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius.
5. Probst, R.; Witterkopf, R.; Krause, M.; Dangschat, H.; Ernst, A. 1998. The New PTB Angle Comparator. Measurement Science Technology, IOP Publishing, 9, p. 1059–1066.
6. Heidenhain, Principles of Action of the Angular Encoders. Available from Internet:
<http://www.heidenhain.de/index.php?WCMSGGroup_489_42=778, (viewed 2009-04-10)>.
7. Kahmen, K.; Faig, W. 1988. Surveying. Berlin: Walter de Gruyter, 578 p.
8. Giniotis, V. et al. 2008. Kampų matavimo sistemų tikslumo bandymo nanometrinės skyros mechatroninių įrenginių kūrimas ir tyrimas (Gono test). Tarpinė ataskaita. Vilnius.
9. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos: vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams, studijuojantiems elektros inžineriją / Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius : Technika, 2005. 343 p. ISBN 9986-05-846-5.
10. Kunigėlis V. Signalų valdymo įtaisai: metodiniai nurodymai studentams. Vilniaus universitetas. Vilnius 2005. 82 .
11. Vishnevsky V. et al. USSR Patent JSe 851560, 1976.
12. Banslavichus R. UdSSR Patent JSe 693493, 1977.
13. William G. May, *Piezoelectric Electromechanical Translation Apparatus* U.S. Patent 3902084, Aug. 26, 1975.
14. K. Spanner, O. Vyshnewskyy, W. Wischnewskiy: New liner ultrasonic micromotor for precioso mechatronic system. Physik Instrument. Germany 2006.

15. Bansevicius R., Knight J. Intelligent Mechanisms with Piezoactive Links: State of the Art, Problems, Future Developments. In: Proceedings of 10th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms. Onlu, Finland. 1999.p.2008-13.
16. Bansevicius R, Parkin R, Jebb A, Knight J. Piezomechanics as a sub-system of mechanisms: present state of the art, problems, future developments. IEE Trans Ind Electron 1996; 43 (1): 23-30
17. Blechertas V. Neharmoninių rezonansinių virpesių pjezoelektrinių variklių kūrimas ir tyrimas: Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas. 2007. 129p.
18. Остапенко Г. С. 1989. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА. Москва: Радио и связи. 400с.
19. Бирюков С. 1995. ГЕНЕРАТОРЫ И ФОРМИРОВАТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ НА МИКРОСХЕМАХ КМОП. Москва: Радио № 9. 54 – 55.
20. A. Just, M. Krause, R. Probst, R. Witterkopf: Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator. Metrologia, 40, 2003, pp. 288-294
21. Bansevicius R, Knight J., Ahmed S. Multi-degree-of-freedom piezoelectric actuators: state of the art and latest developments. Proc. of 6th International Conference on New Actuators - ACTUATOR '98, Bremen, Germany, June 17-19, 1998, pp.341-344.
22. Jebb A, Bansevicius R. Actuator/sensor mechanisms for microrobots. In: Proceedings of 8th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms. Prague, Czechoslovakia. 1991.p.875-8.
23. M. Rybokas, V. Gyniotis, P. Petroškevičius, R. Kulvietienė, D. Bručas: Performance monitoring of geodetic instruments. Insight. (2006), Vol. 48, No 8, pp. 288-291.
24. A. Just, M. Krause, R. Probst, R. Wittekopf: Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator. Metrologia, 40, (2003), pp. 288-294.
25. V. Gyniotis, M. Rybokas, P. Petroškevičius: Investigations into the accuracy of angle calibration, geodesy and cartography (Geodezija ir kartografija), Nr. 3 (30), (2004), pp. 65-70.

PRIEDAI

1 PRIEDAS

PJEZOELEKTRINĖS PAVAROS KŪRIMAS IR TYRIMAS

Arvydas Šulgas

Magistrantas

Mechanikos fakultetas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas

el. p. ArvydasSulgas@gmail.com

Anotacija. Nagrinėjama pjezoelektrinės pavaros pozicionavimo tikslumas ir pjezoelemento suveikimo laikas. Aprašomas tiriamas objektas, jo valdymo įrenginiai ir bandymams naudojama aparatūra. Aptariami atliktų bandymų rezultatai. Pateikiamos išvados ir rekomendacijos

Reikšminiai žodžiai: Pjezoelektrinė medžiaga, pjezovarikliai, rezonansas, virpesiai.

Įvadas

Matavimo ir kalibravimo prietaisams yra keliami ypatingi tikslumo reikalavimai. Šių prietaisų pavaros turi būti mažų matmenų, patikimos, įvairių greičių, turi dirbti žemose ir aukštose temperatūrose. Taip pat turi dirbti įvairiose darbo aplinkose, pvz.: vakuumo ir radiacijos ir t.t (Blechertas 2007).

Pjezoelektriniai varikliai turi visas šias savybes. Jie veikia tyliai, yra paprastos konstrukcijos, mažų matmenų, nes neturi įprastoms pavaroms būdingų sudedamųjų dalių (reduktoriaus, krumpliaračių, diržo ir pan.). Jų galios ir dydžio santykis yra didelis. Kol kas pjezoelektriniai varikliai savo charakteristikomis ir galia negali prilygti buitijei ir pramonėje naudojamiems tradiciniams elektros varikliams, tačiau jie yra naudojami ir labai svarbūs mažų precizinių sistemų pavarose.

Pjezoelektriniams varikliams būdinga: maži matmenys, greitas veikimas, paprastas valdymas ir kt. Šias savybes galima pritaikyti geodezinių kampų kalibravimo prietaisų tiksliam pasukimui (Bansevicius, Giniotis 2002).

Metodai ir priemonės

Darbas atliktas naudojant teorinius ir eksperimentinius tyrimų metodus. Remiantis teoriniais tyrimais, apskaičiuota sukamojo disko linijinis poslinkis ir pjezo elemento veikimo trukmė vieno impulso metu. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Staklių tyrimo laboratorijoje, VGTU Mechanikos fakultete.

Fotoelektriniu kampo keitikliu tirta disko pasisukimas ir jo pozicionavimo tikslumas. Remiantis

pagreičio jutiklių išmatuotais signalais, buvo nustatyti sistemos virpesiai ir pjezo elemento veikimo trukmė.

Eksperimentiniai tyrimai buvo lyginami su teoriniais skaičiavimais.

Tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti pjezoelektrinę pavarą, kuri turėtų būti taikytina kampiniam poizicioinavimui.

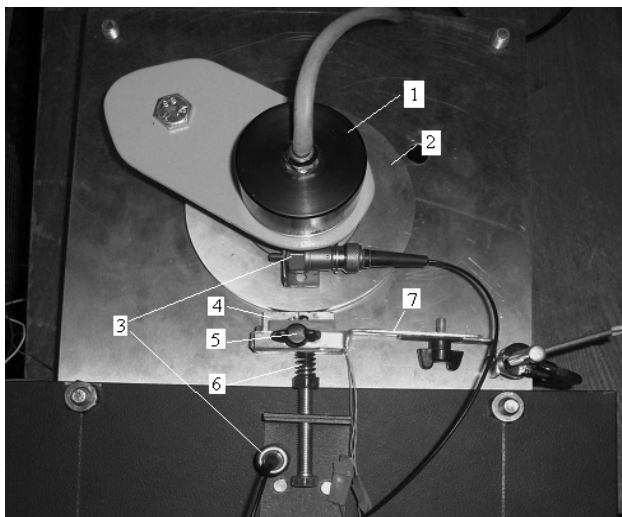
Uždaviniai:

- 3) sukurti pjezoelektrinę sukimo pavarą, taikytiną pozicionavimo staliukui;
- 4) nustatyti sukurtos pjezoelektrinės pavaros pozicionavimo tikslumą;

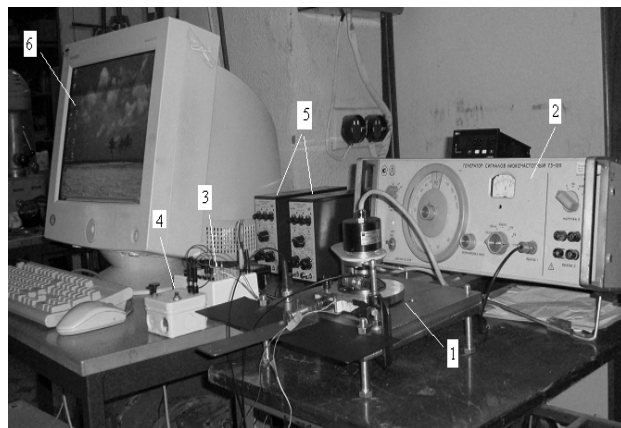
Tyrimo stendas

Remiantis literatūra, suprojektuotas ir pagamintas radialinis pjezoelektrinės pavaros tyrimo stendas (1 pav.). Jį sudaro: plieninis diskas, kurio lietimosi su pjezo elementu paviršius nušlifuotas iki 0,01 mm mušimo ir jis sumontuotas ant guolio. Prie disko, per spyruoklę prispaustas pjezoelementas.

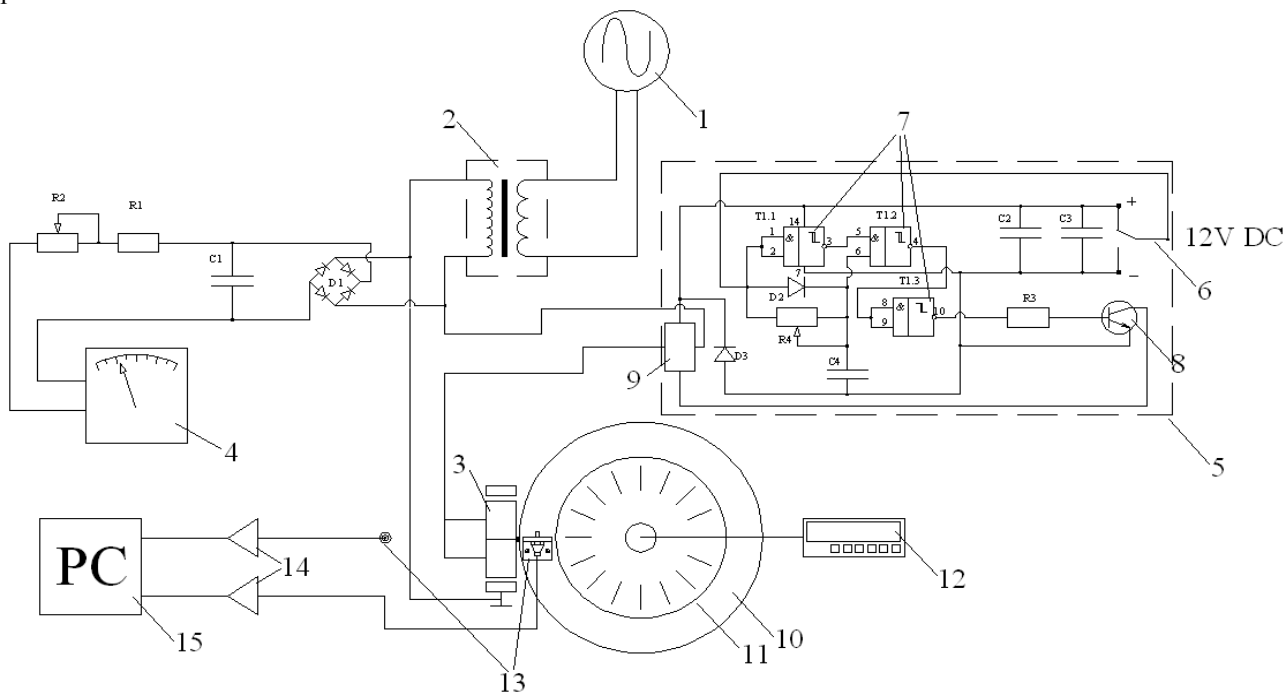
Tyrinėjant pjezo elementą buvo ieškomas jo rezonansinis dažnis ir įtampa. Buvo nustatytas 108 kHz rezonansinis dažnis ir 240 voltų efektyviausia įtampa. Tolimesni bandymai parodė, kad dar didinama įtampa neturėjo jokios įtakos disko sukimuisi, o tik padidino pjezo elemento temperatūrą. Mažinant įtampą galima koreguoti elemento virpėjimą ir sukamo disko greitį.



1 pav. Tiriamasis stendas: 1 – fotoelektrinis kampinis keitiklis; 2 – sukamasis diskas; 3 – pagreičio jutikliai; 4 – pjezoelementas; 5 – varžtas, prispaudžiantis pjezoelementą; 6 – prispaudimo spyruoklė; 7 – kintamos padėties svirtis.



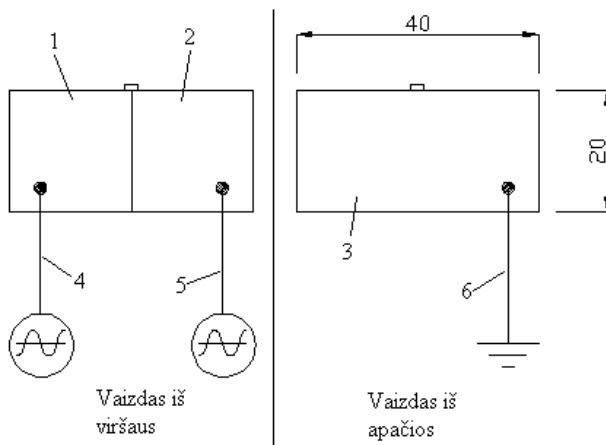
2 pav. Tiriamasis stendas ir jo valdymo, bei duomenų nuskaitymo prietaisai: 1 – tiriamasis stendas; 2 – žemadažnių signalų generatorius Г3-109 (išėjime dažis nuo 17,7 Hz iki 200kHz ir įtampa nuo 15 mV iki 15 V); 3 – įtampos stiprintuvas; 4 – stačiakampio impulso formavimo įrenginys; 5 – signalų stiprintuvas; 6 – kompiuteris.



3 pav. Tiriamos sistemos struktūrinė schema: 1 – dažnių generatorius; 2 – feritinis transformatorius (pirminės apvijos vijų skaičius 20, antros apvijos vijų skaičius 200); 3 – pjezoelementas; 4 – voltmestas; sukamasis metalinis diskas; 5 – stačiakampių impulsų formavimo įrenginys; 6 – mygtukas; 7 – mikroschema (K561TJ11, kuri savyje turi keturis 2 IR – NE elementus, iš kurių 3 yra panaudoti – tai T1.1, T1.2, T1.3); 8 – tranzistorius (KT972A); 9 – rėlė (РЭС 10); 10 – sukamasis diskas; 11 – fotoelektrinis kampo keitiklis (A58 – F); 12 – fotoelektrinio kampo keitiklio nuskaitymo įrenginys; 13 – pagreičio jutikliai (Brüel & Kjær); 14 – stiprintuvai; 15 – kompiuteris; C1 – kondensatorius (300 μ F, 400 V); C2 – kondensatorius (1000 μ F, 50V); C3 – kondensatorius (0,1 μ F); C4 – kondensatorius (0,01 μ F); R1 – varža (1,5 M Ω); R2 – reguliuojama varža (330 k Ω); R3 – varža (100 k Ω); R4 – reguliuojama varža (1,5 M Ω); D1 – diodų tiltas (KI4 407); D2 ir D3 – diodai (KI522B).

Pagal tiriamąjį standą ir jo valdymo, bei duomenų

Pjezoelemento virpesiams sužadinti buvo naudojamas dažnių generatorius (1) (3 pav.). Tačiau generatoriaus išėjime suformuota signalo įtampa pernelyg žema (tik 15 V), todėl buvo panaudotas transformatorius (2), kuris sustiprintų įtampą. Tam panaudotas feritinis transformatorius (Остапенко 1989), nes jis sustiprina tampą nešiskraipydamas dažnio generatoriaus paduodamo dažnio. Transformatoriaus pirminis vijų skaičius 20, o antrinės 200. Apskaičiavus vijų santykį ir patyrinęjus oscilografu, įtampa transformatoriaus išėjime sustiprinama 20 kartų. Iš transformatoriaus (2) „+“ laidas tiesiai sujungtas su pjezo elementu (3), o laidas „+“ įjungiamas į stačiakampių impulsų formavimo įrenginį (5). Šitas įrenginys buvo sukurtas tam, kad galima būtų valdyti pjezo elementą (3). Stačiakampių impulsų formavimo įrenginys buvo pagamintas ant „КМОП“ tipo mikroschemos (7) (Бирюков 1995). Šita mikroschema turi savyje keturis 2 IR/NE, kurie padėjo lengviau valdyti pjezo elementą. Nuspaudus mygtuką (6), mikroschema (7) pradeda veikti ir atidaro tranzistorių (8), kuris įjungia relę (9) ir iš transformatoriaus (2) išeinantis laidas „+“ yra sujungiamas su pjezo elementu (3). Pjezo elementas pradeda virpėti ir pasuka diską (10). Disko linijinį pasukimą fiksuoja fotoelektrinis kampų keitiklis (11), o disko sukimosi laikas yra fiksuojamas pagreičio jutikliais (13). Signalas iš pagreičio jutiklių per stiprintuvus (14) patenka į kompiuterį (15), kur yra matomas disko sukimosi laikas ir visas sukimosi procesas.



4 pav. Pjezo elementas: 1, 2, 3 – elektrodai; 4, 5 – „+“ laidas; 6 – „-“ laidas

Pjezo elemento viršutinis elektrodas yra padalintas į dvi dalis (4 pav., 1 ir 2). Šito reikia tam, kad gauti judesį į abi puses. Padavus įtampą į 4 ir 6

nuskaitymo prietaisus (1 pav.) buvo sudaryta tiriamos

laidus pjezo elementas virpės taip, kad diskas suksis iš dešinės į kairę, o jeigu įtampa paduodama bus per 5 ir 6 laidus, diskas suksis iš kairės į dešinę.

Stačiakampių impulsų formavimo įrenginio veikimas (3 pav., 5)

Kai (6) mygtukas sujungtas su įtampos „+“ laidu, elemente T1.1 įėjime 1 ir 2 yra „aukštas“ (vieneto) lygis, todėl elemento T1.1 išėjime 3 ir elemento T1.2 įėjime 5 ir 6 yra „žemas“ (nulinio) lygis, tai išėjime 4 ir elemento T1.3 įėjime 8 ir 9 yra „aukštas“ lygis, tai jo išėjime 10 „žemas“ lygis, todėl tranzistorius išjungtas ir sistema neveikia.

Kai mygtukas (6) sujungtas su įtampos „-“ laidu kondensatorius C1 labai greitai pasikrauna per diodą D2, todėl atleidus mygtuką nereikia laukti kol pasikraus kondensatorius, kad būtų galima suformuoti sekantį impulsą.

Paspaudus mygtuką (jis persijungia į įtampos „-“ laidą), elemento T1.1 įėjime 1 ir 2 atsiranda „žemas“ lygis, o jo išėjime 3 ir elemento T1.2 įėjime 5 ir 6 „aukštas“, o išėjime 4 ir elemento T1.3 įėjime 8 ir 9 „žemas“ lygis, tai išėjime 10 „aukštas“ lygis. Tada įtampa per varžą R3 patenka į tranzistoriaus (8) bazę. Tranzistorius yra atidaromas ir per jį tekanti srovė įjungia relę kuri įjungia pjezoelektrinę pavarą. Kondensatorius C4 pradeda išsikrauti per varžą R4. Pjezo elemento veikimo trukmė priklauso nuo kondensatoriaus C4 ir varžos R4 sandaugos ($\tau = R \cdot C$).

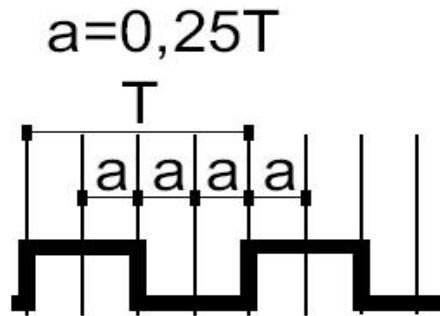
Kai kondensatorius C4 išsikrauna elemento T1.2 įėjime 5 yra „aukštas“, o įėjime 6 „žemas“ lygis, tuomet išėjime 4 yra „aukštas“ lygis. Todėl elemento T1.3 išėjime 10 „žemas“ lygis. Tranzistorius užsidaro ir pjezo pavarą nustoja veikti.

Pjezo pavaros tyrimas

Pjezo pavaros pasukimo tikslumui tirti, pasirinktas rankinis būdas (nuspaudžiant stačiakampio impulso formavimo įrenginio mygtuką), t.y. 20 kartų po 50 paspaudimų, 20 kartų po 100 paspaudimų ir 20 kartų po 200 paspaudimų.

Tirti standą buvo pasirinktas Precizika Metrology fotoelektrinis kampų keitiklis A58-F. Atliekant bandymus iškilo neaiškumu, nes fotoelektrinio kampų keitiklio nuskaitymo įrenginys užfiksavo mažiau impulsų negu yra nuspaudžiama. Siekiant išsiaiškinti ar pjezo elementas visada suveikia ir ar pasisuka diskas, prie tiriamo stando buvo prijungti Brüel & Kjær pagreičio jutikliai.

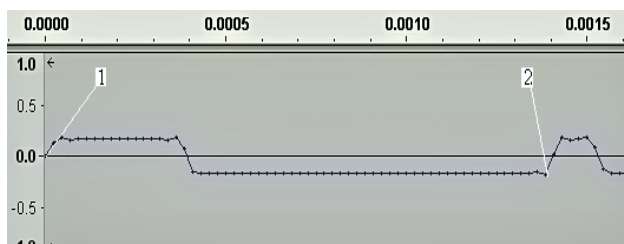
Kiekvieno bandymo metu mygtuko spaudimo procesas buvo užfiksuojamas kompiuterio. Galime padaryti išvadą, kad keitiklio padalos vertė (5 pav., a) yra didesnė, negu disko linijinių poslinkių vieno impulso metu. Fotoelektrinis kampų keitiklis A58-F turi 9000 periodu ir kiekvienas periodas yra dalijamas į 4 impulsus.



5 pav. Fotoelektrinio kampo keitiklio fiksuojamas signalas

a – fotoelektrinio kampo keitiklio nuskaitymo įrenginio fiksuojamas vienas impulsas

Apskaičiuota, kad fotoelektrinio kampo keitiklio fiksuojamo impulso linijinė vertė yra 10,46 μm , o disko linijinis poslinkis per vieną paspaudimą yra nuo 9,03 μm iki 9,52 μm .



6 pav. Pjezoelemento veikimas: 1 – pjezoelemento veikimo pradžia; 2 – pjezoelemento veikimo pabaiga

Taip pat apskaičiuotas ir ištirtas pjezoelemento suveikimo laikas. Pjezoelemento veikimo laiką apsprendžia stačiakampių impulsų formavimo įrenginys, t.y. jame esančio kondensatoriaus „C4“ išsikrovimo laikas. Tai galima apskaičiuoti pagal formulę (1)

$$\tau = R \cdot C = 140\text{k}\Omega \cdot 10\text{nF} = 0.0014 \text{ s} \quad (1)$$

Atlikus bandymus buvo nustatyta, kad teoriniai laiko skaičiavimai sutampa su laiku išmatuotu bandymų metu (6 pav.)

Išvados

Atlikti tyrimai parodė, kad keitiklio padalos linijinės išraiškos vertė ant disko yra didesnė, negu disko paviršiaus linijinis poslinkis kontakte su pjezo elementu. Disko linijinis poslinkis svyruoja nuo 9,03 μm iki 9,52 μm . Jis įvykdomas per 0,0014s.

Kad sumažinti pasisukimo diskretą, reikėtų trumpinti pjezo elemento veikimo laiką. Tam reikėtų stačiakampio impulso formavimo įrenginyje atsisakyti analoginio signalo, relės (3 pav., 9) ir pakeisti jį skaitmeniniu signalu (elektroniniu raktu), nes daugiau sutrumpinant impulso trukmę nespėja suveikti relė.

Taip pat sumažinti pasisukimo diskretą galima būtų prie disko prijungus sliekinę (globoidinę) pavarą.

Padėkos

Dėkoju prof. habil. dr. V. Giniočiui.

Literatūra

Blechertas V. 2007. Neharmoninių rezonansinių virpesių pjezoelektrinių variklių kūrimas ir tyrimas: Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas. 129 p.

Bansevicius R., Giniotis V. 2002. Mechatronic Means for Machine Accuracy Improvement. Mechatronics, Vol. 12, No 9-10, pp. 1133-1143.

Остапенко Г. С. 1989. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА. Москва: Радио и связи. 400 с.

Бирюков С. 1995. ГЕНЕРАТОРЫ И ФОРМИРОВАТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ НА МИКРОСХЕМАХ КМОП. Москва: Радио № 9. 54 – 55.

Piezoelectric drive creation and analysis Arvydas Šulgas

Summary

The piezoelectric drive positioning accuracy and the piezo element play time are analyzed in the paper. The investigated its control equipment and for testing are described. Experimentation results are analyzed. Conclusion and recommendations are given.