



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Daumantas Kriaučiūnas

PRECIZINĖS PJEZOELEKTRINĖS PAVAROS TYRIMAS
INVESTIGATION OF PRECISION PIEZOELECTRIC DRIVE

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
doc. dr. S. Tolvaišienė
(Vardas, pavardė)

(Data)

Daumantas Kriaučiūnas

PRECIZINĖS PJEZOELEKTRINĖS PAVAROS TYRIMAS
INVESTIGATION OF PRECISION PIEZOELECTRIC DRIVE

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Mindaugas Luneckas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) _____
(Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantas dr. Aušra Žemienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) _____
(Parašas) (Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Elektros inžinerijos studijų kryptis
Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048
Automatinių sistemų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėja

(Parašas)
doc. dr. S. Tolvaišienė
(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2023-05-20 Nr. AUSfm-21-1703
Vilnius

Studentui (ei)

Daumantui Kriaučiūnui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2023 m. gegužės 29 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

IVADAS

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

- 1.1. Pjezoelektra
- 1.2. Pjezoelektriniai varikliai

2. TEORINĖ DALIS

- 2.1. Pjezoelektrinių pavarų valdymo metodai
- 2.2. Parametrų apžvalga renkantis stiprintuvą
- 2.3. Precizinės pjezoelektrinės pavaros maketo sudarymas

3. TIRIAMOJI DALIS

- 3.1. Pasisukimo paklaidos priklausomybė nuo dažnio ir bangos tipo
- 3.2. Pasisukimo paklaidos priklausomybė nuo sukimosi greičio
- 3.3. Sukimosi greičio priklausomybė nuo valdymo bangos dažnio

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

dr. Aušra Žemienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

doc. dr. Mindaugas Luneckas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

Daumantas Kriaučiūnas
(Vardas, pavardė)
2023-05-20
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektros inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 2
Data 2023-05-20

Automatikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimas**

Autorius **Daumantas Kriauciūnas**

Vadovas **doc. dr. Mindaugas Luneckas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama precizinė pjezopavara. Pagrindinės darbo dalys: literatūros apžvalga, pjezopavaros, valdymo metodai, eksperimentiniai tyrimai. Taikyta eksperimentinio tyrimo metodika apžvelgiama, tyrimo skyriuose. Eksperimentiniam baigiamojo magistro darbo tyrimui atlikti, pagamintas demonstracinis precizinės pjezoelektrinės pavaros modelis, pateiktas programos kodas. Naudojant modelį siekiama ištirti pavaros sustojimo nuokrypos priklausomybę nuo pagrindinių parametrų. Pagrindiniai nagrinėjami parametrai pavaros sustojimo tikslui tirti yra šie: dažnis, įtampa, valdymo banga. Tiriamojoje dalyje pateikiama gautų rezultatų lentelės ir grafikai. Nustatomos pagrindinės konstrukcinės sąlygos gaminant precizinę pjezoelektrinę pavarą.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros analizė, teorinė dalis, tiriamoji dalis, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas, priedai.

Darbo apimtis – 70 p. teksto be priedų, 59 iliustr., 22 lent., 31 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: dažnis, įtampa, pjezoelektrinė medžiaga, pjezopavara, rezonansas, virpesiai.

Vilniaus Gedimino Technical University
Faculty of Electronics
Department of Electrical Engineering

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2023-05-20

Automation study programme master thesis

Title **Investigation of precision piezoelectric drive**

Author **Daumantas Kriaučiūnas**

Academic supervisor **doc. dr. Mindaugas Luneckas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The final master's thesis examines the investigation of precision piezoelectric drive. The main components of the work include a literature review, piezoelectric actuators, control methods, and experimental research. The applied methodology of the experimental study is discussed in the research chapters. To conduct the experimental research for the final master's thesis, a demonstrative model of a precision piezoelectric drive was produced and the program code was provided. The model is used to investigate the dependence of the main parameters on the actuator's stopping accuracy. The key parameters investigated for the purpose of studying the actuator's stopping accuracy are frequency, voltage, and control signal. The research section presents tables and graphs of the obtained results. The fundamental design conditions for manufacturing a precision piezoelectric actuator are determined.

The thesis consists of 6 parts: introduction, literature analysis, theoretical part, research part, conclusions and recommendations, bibliography, appendices.

The scope of the thesis is 70 pages of text without appendices, 59 illustrations, 22 tables, and 31 bibliographic sources.

The appendices are provided separately.

Keywords: frequency, piezoelectric actuator, piezoelectric material, , resonance, vibrations, voltage.

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Daumantas Kriaučiūnas 20201201

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Automatika, AUSfm-21

(Studijų programa, akademinė grupė)

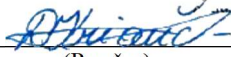
BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2023 m. gegužės 20 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema „Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Aušra Žemienė. Mano darbo vadovas docentas daktaras Mindaugas Luneckas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs(-usi).


(Parašas)

DAUMANTAS KRIAUČIŪNAS
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

IVADAS	12
1. LITERATŪROS ANALIZĖ	14
1.1. Pjezoelektra.....	14
1.2. Pjezoelektriniai varikliai	15
1.2.1. Inerciniai varikliai.....	16
1.2.2. Žingsniniai varikliai.....	16
1.2.3. Ultragarsiniai varikliai.....	17
1.2.4. Pjezoelektinių variklių taikymas	18
2. TEORINĖ DALIS	19
2.1. Pjezoelektrinių pavarų valdymo metodai	19
2.1.1. Valdymas staliniais stiprintuvais	20
2.1.2. Valdymas specializuotais integriniais grandynais	20
2.1.3. Valdymas stiprintuvų moduliais.....	21
2.1.4. Maitinimas iš nuolatinės įtampos šaltinio	22
2.1.5. Maitinimas iš kintamosios įtampos tinklo	22
2.2. Parametrų apžvalga renkantis stiprintuvą	23
2.2.1. Išvesties ir įvesties įtampa	23
2.2.2. Išvesties srovė.....	23
2.2.3. Dažnis	24
2.2.4. Maksimali galia	24
2.2.5. Elektrinė talpa.....	24
2.3. Precizinės pjezoefekto pavaros maketo sudarymas	25
2.3.1. Konstrukcinė dalis	25
2.3.2. Elektroninė dalis	28
2.3.3. Valdymo signalo banga	32
2.3.4. Pjezokeramikinio disko impedans-dažninė ir fazinė charakteristika ir elektrinė talpa	52
3. TIRIAMOJI DALIS	56
3.1. Pasisukimo paklaidos priklausomybė nuo dažnio ir bangos tipo	57
3.2. Pasisukimo paklaidos priklausomybė nuo sukimosi greičio	59
3.3. Sukimosi greičio priklausomybė nuo valdymo bangos ir dažnio	65
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	67
LITERATŪROS SĄRAŠAS	68
PRIEDAI	71

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Pjezoelektrinės keramikos kristalinės struktūros schema: a) teigiamo ir neigiamo krūvių išsidėstymo kubinė gardelė; b) simetrinė tatragonalinė gardelė (prijungtas el. laukas)	14
1.2 pav. Energijos keitimas pjezovarikliuose	15
1.3 pav. Pjezoelektrinių variklių klasifikacija	15
1.4 pav. Blokinė pjezoelektrinio variklio schema	16
1.5 pav. Principinė inercinio pjezovariklio schema	16
1.6 pav. Principinė žingsninio pjezovariklio schema	17
1.7 pav. Supaprastinta ultragarsinio variklio schema	17
1.8 pav. Pjezovariklių naudojimo sritys	18
2.1 pav. Stalinis stiprintuvas	20
2.2 pav. Integrinio grandyno mikroschema BOS1901	21
2.3 pav. QBS-234 stiprintuvo modulis	21
2.4 pav. Impulsinis nuolatinės srovės maitinimo šaltinis	22
2.5 pav. PiezoFlo ventiliatorius, maitinamas iš elektros tinklo	22
2.6 pav. EPA-104 stiprintuvo skirtingos didžiausios įtampos ir dažnio diapazono kombinacijos	24
2.7 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros konstrukcinė schema	25
2.8 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros konstrukcija iš viršaus	26
2.9 pav. Anglies pluošto strypo judėjimo trajektorija veikiant pjezoelektrinį diską pjezoelektriniam efektui	26
2.10 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo maketas: a) bendras maketo vaizdas; b) pjezokeramikinis diskas su pritvirtintu anglies pluoštu, guolis ant kurio diametriškai įmagnetintas magnetas, guolio padėčiai nustatyti, virš magneto padėties jutiklis AS5600; c) ant pjezokeramikinio disko pritvirtinto anglies pluošto atramos kontaktinis atramos kampas į guolį	27
2.11 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros funkcinė schema	28
2.12 pav. Arduino UNO R3 valdiklis	28
2.13 pav. 12 bitų padėties jutiklis AS5600 jutiklio bendras vaizdas	29
2.14 pav. Padėties jutiklio rezoliucija esant skirtingoms magneto padėtimis	29
2.15 pav. „DFPlayer mini“ bendras leistuvo vaizdas	29
2.16 pav. TDA7498 D – klasės garso stiprintuvas	30
2.17 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros maketo blokinė schema	31
2.18 pav. Valdymo signalo bangos: a) sinusinė; b) stačiakampė; c) trikampė; d) pjūklinė	32
2.19 pav. Valdymo signalo bangos analizės aplinka, kai analizuojamas signalas, be garso stiprintuvo	33

2.20 pav. Sinusinės bangos 13 kHz: a) iš leistuvo b) iš kompiuterio	34
2.21 pav. Stačiakampės bangos 200 Hz: a) iš leistuvo b) iš kompiuterio	36
2.22 pav. Stačiakampės bangos 6 kHz: a) iš leistuvo b) iš kompiuterio	37
2.23 pav. Sugeneruota stačiakampė banga 12 kHz iš kompiuterio	38
2.24 pav. Trikampė banga 1 kHz: a) iš leistuvo; b) iš kompiuterio	39
2.25 pav. Trikampė banga 5 kHz: a) iš leistuvo; b) iš kompiuterio	40
2.26 pav. Sugeneruota trikampė banga iš kompiuterio 7 kHz	41
2.27 pav. Pjūklinė banga 1 kHz: a) iš leistuvo b) iš kompiuterio	42
2.28 pav. Pjūklinė banga 3 kHz: a) iš leistuvo; b) iš kompiuterio	43
2.29 pav. Sugeneruota pjūklinė banga iš kompiuterio: a) 9kHz; b) 12 kHz	44
2.30 pav. Sinusinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos: a) 8 kHz; b) 11 kHz; c) 12 kHz; d) 13 kHz	46
2.31 pav. Stačiakampės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos: a) 0,2 kHz; b) 1 kHz; c) 3 kHz	47
2.32 pav. Stačiakampės bangos valdymo 8 kHz signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos	48
2.33 pav. Pjūklinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos: a) 0,2 kHz; b) 1 kHz.....	50
2.34 pav. Pjūklinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos: a) 3 kHz; b) 4 kHz	51
2.35 pav. 50 mm įtvirtinto pjezokeramikinio disko impedans-dažninė ir fazinė charakteristika	52
2.36 pav. 50 mm neįtvirtinto pjezokeramikinio disko impedans-dažninė ir fazinė charakteristika ...	53
2.37 pav. 35 mm įtvirtinto pjezokeramikinio disko impedans-dažninė ir fazinė charakteristika	54
2.38 pav. Pjezokeramikinio disko elektrinė talpa: a) neįtvirtinto disko; b) įtvirtinto disko	55
3.1 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo maketo laboratorijoje blokinė schema	56
3.2 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo aplinka laboratorijoje	56
3.3 pav. Sinusinių ir stačiakampių valdymų signalo bangų vidutinės paklaidos ir standartinio nuokrypio priklausomybės nuo dažnio grafikas.....	57
3.4 pav. Valdymo signalų paklaidos priklausomybės nuo bangos formos grafikas	58
3.5 pav. Sinusinės 8 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama..	59
3.6 pav. Sinusinės 11 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama	60
3.7 pav. Sinusinės 12 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama	61

3.8 pav. Sinusinės 13 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama	62
3.9 pav. Stačiakampės 1 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama	63
3.10 pav. Stačiakampės 3 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama	64
3.11 pav. Valdymo signalų greičio priklausomybė nuo bangos formos grafikas	65
3.12 pav. Sinusinių ir stačiakampių valdymo signalų bangų vidutinio greičio ir standartinio nuokrypio priklausomybių nuo dažnio grafikas.....	66

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Ultragarsinių variklių privalumai ir trūkumai	18
2.1 lentelė. Stiprintuvo, valdiklių apžvalga	20
2.2 lentelė. Sinusinės bangos kokybės analizės preliminarūs duomenys iš leistuvo ir kompiuterio ...	33
2.3 lentelė. Stačiakampės bangos kokybės analizės preliminarūs duomenys iš leistuvo ir kompiuterio.....	35
2.4 lentelė. Trikampės bangos kokybės analizės preliminarūs duomenys iš leistuvo ir kompiuterio .	38
2.5 lentelė. Pjūklinės bangos kokybės analizės preliminarūs duomenys iš leistuvo ir kompiuterio	41
2.6 lentelė. Sinusinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties ir įvesties duomenys	45
2.7 lentelė. Stačiakampės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties ir įvesties duomenys.....	48
2.8 lentelė. Trikampės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties ir įvesties duomenys	49
2.9 lentelė. Pjūklinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties ir įvesties duomenys	49

IVADAS

Didėjant technologijų poreikiams norima mechaninius procesus atlikti ne tik greitai, tačiau ir tiksliai. Sparčiai keičiantis jos reikalavimams, pastebimos ryškios tendencijos, jog daugėja mechanizmų, reikalaujančių labai aukšto veikimo tikslumo ir jautrumo, o nepaisant visą to būtų atsparios išoriniams veiksniams, tokiems kaip: chemikalai, drėgmė, šiluma. Tradicinei techninei įrangai įgyvendinti tokius reikalavimus tampa labai sudėtinga, sukuriamos sistemos neturi aukšto efektyvumo lygio, jos darosi vis mažiau pageidaujamos, todėl nuolat ieškoma metodų kaip paprastai pasiekti aukščiausią rezultatą. Siekiant atsakyti žmogaus darbo, sistemos turi dirbti ne tik patikimai, bet ir labai tiksliai, kad nereiktų jų kontroliuoti. Dėl šių aplinkybių pjezoelektrinės virpesių sistemos kelia vis didesnę elektrotechnikų ir mokslininkų susidomėjimą, kadangi jos gali generuoti aukštos raiškos signalus, kas pavaras padaro tikslias ir greitas, o nepaisant to jos yra atsparios šilumai, chemikalams ir drėgmei.

Pjezoelektrinėmis savybėmis pasižyminčios medžiagos elektrinį impulsą paverčia mechaniniu judesiu ir atvirkščiai. Įrenginiai su šiomis medžiagomis yra kompaktiški, pasižymi greitaveika, mažais elektromagnetiniais triukšmais, dideliu galios ir masės santykiu. Pjezoelektriniai varikliai tyliai veikia ir svarbiausia, yra paprastos konstrukcijos, įprastai mažų matmenų, be to – jų galia nėra sąlygojama dydžio, jie veikia vakuume ir radiacinėje aplinkoje, jų veikimas yra mažai įtakojamas aplinkos temperatūros. Pjezoelektriniai varikliai savo savybėmis, kol kas, nėra pajėgūs pakeisti mūsų buityje ir pramonėje taip plačiai naudojamus elektromagnetinius variklius, bet jie yra puikus sprendimas mažų, precizinių variklių rinkoje, kurioje elektromagnetiniai varikliai nėra pajėgūs atitikti sistemos keliamų reikalavimų. Nors šie varikliai sukurti dar praeitam šimtmetyje, tačiau jų plataus praktinio taikymo galimybės pradėtos nagrinėti tik paskutiniais dešimtmečiais, tai lėmė sparčiai didėjantis precizinių pozicionavimo sistemų poreikis įvairiose srityse – optikoje ir vaizdo kameroje, medicinos ir pramonės robotikoje, orlaivių ir erdvėlaivių kontrolės sistemose, mikro ir nano pozicionavimo reikalaujančiose įrenginiuose.

Visais laikais buvo itin svarbu tikslumas, o šiai dienai ir mažos elektros energijos sąnaudos. Nors pirmasis pjezoelektrinis variklis ir buvo išrastas 1917 m., bet jų potencialas ir galimybės vis dar tiriamos nepaisant to, kad yra plačiai naudojamos. Kaip ir visos pavaros, pjezoelektrinė pavara taip pat turi ir teigiamų ir neigiamų savybių. Kelios neigiamų savybių yra, kad pjezoelektrinės pavaros konstrukcija yra brangi, ribotas pavaros galingumas, sudėtingas valdymas. Šiame darbe tyrinėjama, pjezoelektrinės pavaros tikslumas, padarius paprastą modelį, namų sąlygomis.

Šiame darbe, bus nagrinėjama reali precizinė pjezoelektrinė pavana su grįžtamuju ryšiu. Grįžtamąjį ryšį formuos padėties jutiklis, signalui generuoti, naudojamas signalo leistuvas, o jam sustiprinti – stiprintuvas. Komponentai parenkami išnagrinėjus literatūrą. Sudarytas standas, kuris skirtas atlikti eksperimentinius pjezoelektrinės pavaros bandymus.

Darbo tikslas - sudaryti ir ištirti precizinę pjezoelektrinę pavara, kuri gebėtų kuo tiksliau pasisukti užduotu kampu.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti pjezoelektrinių pavarų veikimo principą ir sandarą, nustatyti jų panaudojimo galimybes, taikymą;
2. Apžvelgti pjezoelektrinių pavarų valdymo metodus;
3. Sudaryti: struktūrinę schemą ir sistemos funkcinę elektros schemą;
4. Sukurti precizinės pjezoelektrinės pavaros maketą ir sudaryti valdymo programą;
5. Eksperimento būdu ištirti sudarytą pjezoelektrinę pavara. Patikrinti, kaip pavaros tikslumą veikia skirtingi valdymo signalai.

Darbo struktūra. Darbą sudaro įvadas, teorinė dalis, kurioje analizuojama precizinės pavaros ir pjezoelektros samprata, veikimas ir valdymo metodai. Empirinė dalis, kurioje yra atliekami įvairūs matavimai ir nagrinėjama pavaros veikimas, tikslumas, ją valdančių įrenginių, bei jų kuriamų signalų priklausomybė tikslumui. Pateikiamos išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas, priedai.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

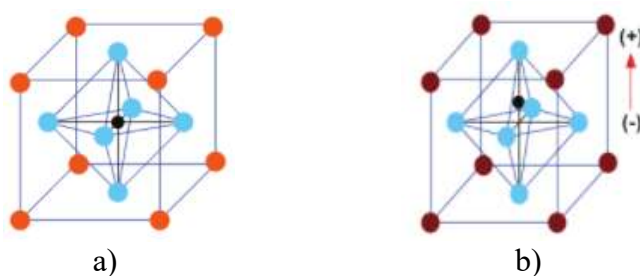
Šioje dalyje pateikiama pjezoelektros veikimo principas, paaiškinama kas tai yra. pateikiama galimų pjezoelektrinių pavarų tipai, veikimo principas ir jų panaudojimas.

1.1. Pjezoelektra

Pjezoelektra – kai kurių veikiamų mechaniniais įtempiais medžiagų savybė kaupti savo paviršiuose elektros krūvį (tiesioginis pjezoreiškinys) arba veikiamų elektrinio lauko medžiagų deformacija (atvirkštinis pjezoreiškinys). [1]

Šios medžiagos vadinamos pjezoelektrinėmis medžiagomis. Joms būdinga monokristalinė arba polikristalinė struktūra. Šis reiškinys plačiai taikomas akustinių žadintuvų ir jutiklių gamyboje, mikropozicionavimo ir tikslaus fokusavimo įrenginiuose, elektroniniuose aukštų įtampų ir dažnių prietaisuose ir kitose srityse. [1]

Pjezoelektrinių savybių turi gamtoje randamos medžiagos, pvz., kvarcas, tačiau praktiškai įvairiems technikos poreikiams naudojama keramika, turinti pjezokristalinę struktūrą iš segnetoelektrinių savybių kristalitų. Kristalitai turi domeninę struktūrą ir skirtingą kristalografinių ašių išdėstymą. Pjezokeramikinių medžiagų savybės apibūdinamos cheminių elementų sudėtimi ir priklauso nuo gamybos technologijos. Reikia priminti, kad keramikinės medžiagos, iš jų ir pjezokeramika, priskiriama dielektrikams, t. y. medžiagoms, turinčioms labai didelę elektrinę varžą. Pjezoelektrinei keramikai būdinga kristalinė struktūra, kurios kiekviena dalelė susideda iš keturvalenčio metalo jono kristalinėje gardelėje ir didelio divalenčio metalo, taip pat deguonio O-2 jonų. Dėl tokios struktūros kristalai įgauna trikampę arba rombinę simetriją ir sukuriamas dvipolis momentas. Pjezoelektrinės keramikos struktūros schema pateikta 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Pjezoelektrinės keramikos kristalinės struktūros schema: a) teigiamo ir neigiamo krūvių išsidėstymo kubinė gardelė; b) simetrinė tatragonalinė gardelė (prijungtas el. laukas) [1]

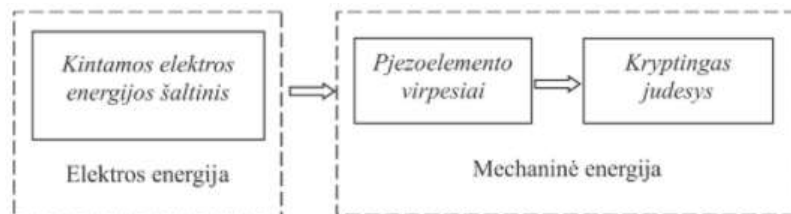
Tiriant įvairias keramikines medžiagas, pasižyminčias pjezoeffektu, buvo atrasta, kad medžiagų kompozicija iš švino (Pb), cirkonio (Zr) ir titano (Ti) yra daug didesnio jautrio ir aukštesnės darbinės temperatūros. Tokie pjezoelementai, pagaminti minėtų medžiagų pagrindu, šiuo metu yra plačiausiai naudojami įvairiose srityse. Precizinės technikos ir technologijos įtaisuose plačiausiai naudojamos

pjezokeramikinės medžiagos – tai dviejų komponentų sistema: švino titanis-cikonas (PbTiO_3 - PbZrO_3) arba daugiakomponentų sistemos tų pačių bazinių elementų pagrindu. [1]

1.2. Pjezoelektriniai varikliai

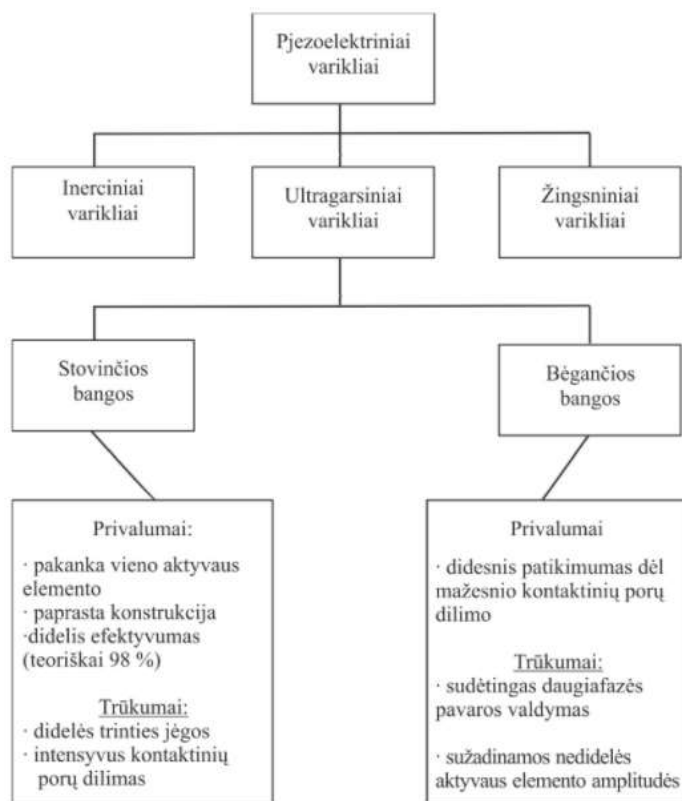
Pjezoelektriniai varikliai pasižymi paprasta konstrukcija, mažais gabaritais ir svoriu, naudoja minimaliai energijos, kai kurios šių įtaisų charakteristikos, pvz., didelė skyra, greitaveika, paprastas valdymo algoritmas ir patikimumas yra labai svarbios savybės mechatroninėms sistemoms kurti. [2]

Pjezoelektrinis variklis tai elektrinis – mechaninis energijos keitiklis, kuriam mechaniniai virpesiai sukelia tolygų išvesties grandies sukamąjį, slenkamąjį arba žingsninį judesį. Čia energijos keitimui naudojamas elektrinis laukas, kuriam veikiant gaunami pjezokeraminio elemento virpesiai, kurie per kontaktinę zoną sukelia išvesties grandies judesį. Energijos keitimas pavaizduotas 1.2 paveiksle.



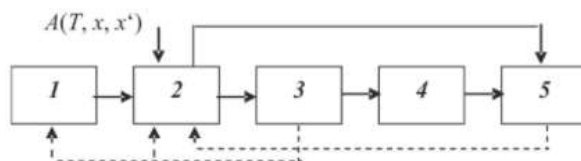
1.2 pav. Energijos keitimas pjezovarikliuose [2]

Pjezoelektriniai varikliai gali būti skirstomi į tris, pagrindines grupes: inercinius, žingsninius ir ultragarsinius. Jų klasifikacija pateikta 3 paveiksle



1.3 pav. Pjezoelektrinių variklių klasifikacija [1]

Pjezoelektrinio variklio, kaip mechatroninės sistemos, analizė leidžia atlikti išsamią pjezoelektrinių variklių klasifikaciją pagal įvairius šios sistemos parametrus.

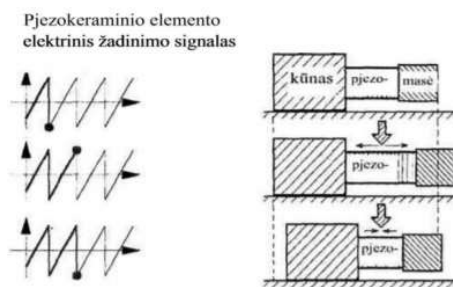


1.4 pav. Blokinė pjezoelektrinio variklio schema [1]

1.4 paveiksle pateikti svarbiausi pjezoelektrinio variklio funkciniai elementai ir tarpusavio ryšiai. Aukšto dažnio generatorius 1, teikiantis skirtingo dažnio ir fazės signalus į valdiklį 2, kuriame pagal tam tikrą valdymo dėsnį signalai moduluojami ir perduodami į variklio įvesties grandį 3. Tokiu principu elektrinė energija įvesties grandyje paverčiama į išvesties grandies 5 mechaninį sukamąjį arba linijinį judesį per valdomą arba nevaldomą kontakto zonoje ryšio grandį 4.

1.2.1. Inerciniai varikliai

Inercinių variklių veikimas pagrįstas inercijos, sausosios trinties jėgų ar judesio greičio asimetrija žadinimo virpesio ciklo period. 1.5 paveiksle pateiktas inercinio pjezovariklio veikimo principas, kai variklio inercinei masei suteikiamas asimetris virpesys. Tokiu būdu sukurta asimetrinė inercinė jėga perduodama kūnui - šliaužikliui, kuris pradeda mažais žingsneliais, kryptingai judėti išilgai kreipiančiųjų. Šio šliaužiklio kryptingo judesio sąlyga yra ta, kad šliaužiklį veikianti inercinė jėga turi būti didesnė už trinties jėgą tarp šliaužiklio ir kreipiančiųjų. Šio tipo varikliuose vieno periodo metu, papildomais veiksniais sužadinus trinties jėgų asimetriją, šliaužiklis kryptingai judės ir esant simetriniams inercinės masės virpesiams. [1]



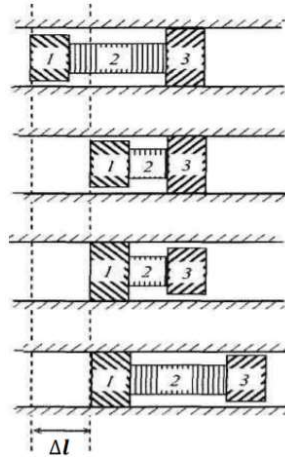
1.5 pav. Principinė inercinio pjezovariklio schema [1]

1.2.2. Žingsniniai varikliai

Žingsninis variklis sudarytas iš trijų, nuosekliai sujungtų vykdyklių, kurių nuoseklus ciklinis veikimo principas užtikrina kryptingą įrenginio judesį. Tokio variklio veikimo principas matomas 1.6 paveiksle. Čia du kraštiniai vykdykliai 1 ir 3 gali būti ir ne pjezoelektriniai, tačiau vidurinis vykdyklis 2 turi būti pjezoelektrinis, nes nuo jo priklauso judesio tikslumas. Kad variklis atliktų vieną žingsnį Δl , vykdyklių darbo eiliškumas turi būti toks: vykdyklis 1 atjungiamas nuo kreipiančiųjų;

vykdiklis 2 sutrumpėja dydžiu Δl ; vykdiklis 1 įtvirtinamas kreipiančiosiose; vykdiklis 3 atjungiamas nuo kreipiančiųjų; vykdiklis 2 pailgėja dydžiu Δl .

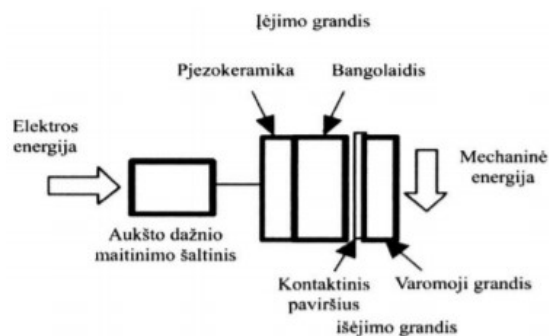
Linijinio žingsninio pjezovariklio principinė schema pateikta 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Principinė žingsninio pjezovariklio schema [1]

1.2.3. Ultragarsiniai varikliai

Ultragarsiniai varikliai, pagaminti naudojant pjezokeramiką, kurios efektyvumas nepriklauso nuo dydžio, tarp miniatiūrinių variklių yra pranašesni. Ultragarsiniuose varikliuose panaudoti vienas arba keli pjezokeraminiai elementai, kurių kontakto zonoje su išvesties grandimi generuojamas mažos amplitudės aukšto dažnio elipsinis judesys. Tokiuose varikliuose paprastai sužadinami ultragarsinio dažnio rezonansiniai virpesiai, leidžiantys žymiai padidinti tokio tipo įrenginių efektyvumą. Supaprastinta daugelio ultragarsinių variklių struktūra parodyta 1.7 paveiksle. Ją sudaro aukšto dažnio maitinimas, vibratorius ir rotorius. Vibro variklį sudaro įvesties grandis (pjezoelektrinis elementas) ir išvesties grandis (varomoji grandis su trinties danga).



1.7 pav. Supaprastinta ultragarsinio variklio schema [1]

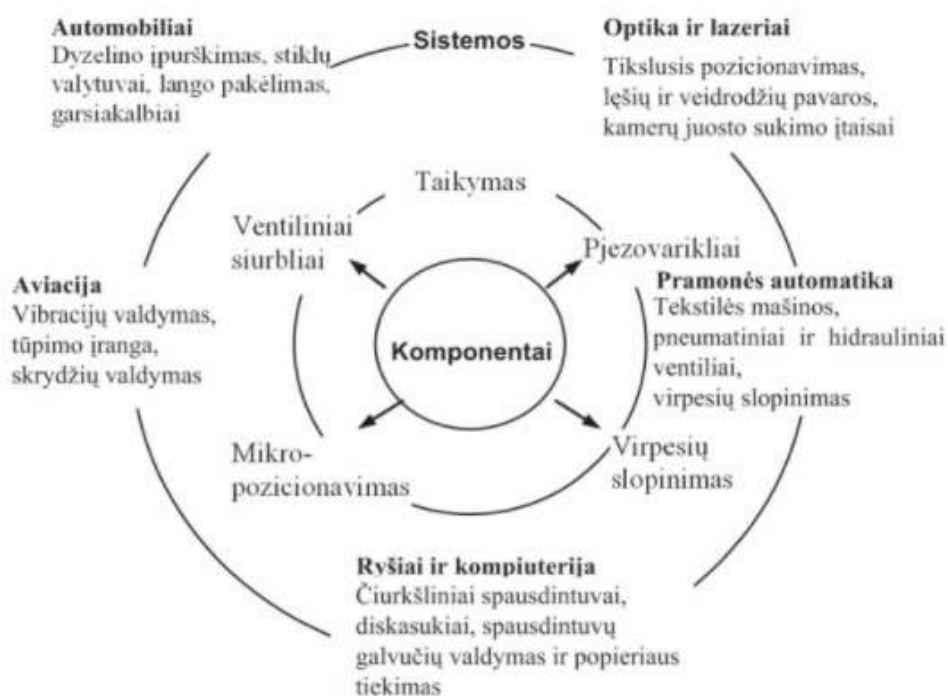
1.1 lentelė. Ultragarsinių variklių privalumai ir trūkumai.

Privalumai	Trūkumai
• Mažas greitis ir didelis sukimo momentas; • greita reakcija, didelis greičio diapazonas, kieti stabdžiai ir jokios tuščiosios eigos; • didelis galios koeficientas ir efektyvumas; • tylus veikimas; • kompaktiškas dydis ir nedidelis svoris; • paprasta konstrukcija ir lengvas gamybos procesas; • nežymus išorinių magnetinių ar radioaktyvių laukų poveikis;	• Būtinasis aukšto dažnio maitinimas; • mažesnis patvarumas dėl frikcinės varomosios jėgos sukkelto nusidėvėjimo.

1.2.4. Pjezoelektrinių variklių taikymas

Pjezomechaniniai mechatronikos ir automatikos elementai turi daug privalumų: kompaktiškumas ir maža masė, didelė jėga, praktiškai neribota skiriamoji geba, platus darbinių dažnių diapazonas, proporcingas prijungtai įtampai poslinkis, didelis naudindumo koeficientas. [1]

Pjezomechaniniai keitikliai naudojami mikromanipuliatoriuose, triukšmo ir vibracijų slopinimo sistemose, vožtuvuose, lazeriuose ir optikoje, objektų padėties valdymo įrenginiuose, relėse, siurbliuose, automobilių pramonėje, pramonės automatikos sistemose, telekomunikacijų įrenginiuose, kompiuteriuose aviacijoje. Pjezovariklių panaudojimo sritys pateiktos 1.8 paveiksle.[1]



1.8 pav. Pjezovariklių naudojimo sritys [1]

2. TEORINĖ DALIS

Teorinėje dalyje apžvelgiami pjezoelektrinių pavarų valdymo metodai, pagrindiniai valdymo signalo stiprintuvo parametrai, kuriamas precizinės pjezoelektrinės pavaros modelis.

2.1. Pjezoelektrinių pavarų valdymo metodai

Norint, kad pjezoelektrinis keitiklis būtų naudojamas kaip pvara, pirmiausia reikalinga tam tikras atitinkančias charakteristikas turinti elektros įvestis arba valdymo signalas. Pagrindiniai elektriniai įvesties valdymo būdai yra dažnis ir įtampos amplitudė. Keičiant dažnį yra nustatoma, koks greitas yra pjezoelektrinis reiškiny, kaip greitai pjezokeramika vibruos arba pakeis būseną.

Valdymo metodai gali būti pertraukiamieji ir nuolatiniai priklausomai nuo to, ką reikia valdyti. Pertraukiamieji naudojami tuomet, kai reikia pakeisti iš vienos būsenos į kitą. Pavyzdys – vožtuvas, kurio būsenos gali būti „atidaryta“ arba „uždaryta“, nurodomos dvi padėtys, kurios yra galimos ir valdomos ta kryptimi, kuria norima valdyti vožtuvą. Nuolatinio valdymo pavyzdžiai yra tokie, kuriais nuolat teka srovė, kitaip tariant nuolat yra valdomi. Tokių sistemų pavyzdžiai yra pjezoelektrinis ventiliatorius ir pjezoelektrinis garsiakalbis. Pjezoelektrinis ventiliatorius viso veikimo metu veikia pastoviai didžiausia įtampa, bei nekintančiam dažniui. Veikiant pjezoelektriniam garsiakalbiui, nuolat yra keičiamas dažnis, kad būtų gautas skirtingas garso signalas. Iš pavyzdžių matyti, kad skirtingiems įrenginiams reikalingas, skirtingas valdymas. Daugeliui projektų yra reikalingas stiprintuvas, kad padidintų iki aukšto lygio valdymo signalo įtampą, kuri yra reikalinga pjezoelektriniai keramikos įjungimui į norimą amplitudę, poslinkį ar padėtį.

Pjezoelektrinė pavaros įprastai yra valdomos aukšta įtampa, t. y. nuo 50 iki 200 V, kad būtų sukurta norima jėga arba atliekamas norimas postūmis, poslinkis. Kad sugeneruoti aukštą įtampą, reikia pasirinkti vieną iš tinkamiausių būdų. Rinkoje yra skirtingų tipų ir stilių stiprintuvų. Stiprintuvo parinkimas priklauso nuo to, kokie yra parinkimo įgūdžiai ir kokie reikalavimai yra keliami pavarai, taip pat yra svarbu sistemai reikalinga išvesties galia ir valdiklio, stiprintuvo dydis. Stiprintuvo, valdiklio dydžiai ir išvesties galios yra pateiktos 2.1 lentelėje. [3]

2.1 lentelė. Stiprintuvo, valdiklių apžvalga [3]

Stiprintuvo arba valdiklio tipas	Santykinis dydis	Išvesties galia	Panaudojimo pavyzdys
Staliniai stiprintuvai	Didelis	Aukštas	Tyrimai ir vystymas
COTS integriniai grandynai	Mažas	Žema	Ant kūno naudojami prietaisai
Stiprintuvo moduliai	Vidutinis	Vidutinis	Automobiliai/lėktuvai
NS maitinimo šaltiniai	Skiriasi	Skiriasi	Vožtuvas
Maitinimas iš tinklo (rozetės)	Mažas	Aukštas	Pjezoelektrinis ventiliatorius
Pasirinktiniai	Skiriasi	Skiriasi	Individualūs sprendimai

2.1.1. Valdymas staliniais stiprintuvais

Stalinis stiprintuvas (2.1 paveikslas) dėl jo didelio našumo, lankstumo dažniausiai yra naudojamas, jo kūrimo pradiniam etape. Šie stiprintuvai veikia įvairaus dažnio ir įtampos sąlygomis (įskaitant nuolatinės srovės). Stiprintuvai pasižymi stabiliu signalu, su minimaliu triukšmu ir iškraipymais, todėl galima lengviau ir tiksliau atlikti pjezoelektrinius mokslinius tyrimus ir tobulinimo darbus, negalvojant apie maitinimo šaltinį ir stiprintuvą. Tačiau šis didelio našumo stiprintuvas yra brangus ir neekonomiškas. Staliniai stiprintuvai dažniausiai būna dideli, sunkūs ir reikalaujantys daug elektros energijos. Elektros energija gali būti netikslingai naudojama, todėl gali būti generuojamas didelis šilumos kiekis, kad būtų gautas reikiamas valdymo signalas. Kai sistema ar įrenginys jau atitinka keliamus reikalavimus, stalinį stiprintuvą galima pakeisti tinkamesniu sprendimu, kuris būtų ekonomiškesnis. [3]

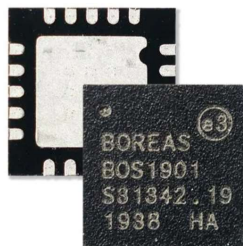


2.1 pav. Stalinis stiprintuvas [16]

2.1.2. Valdymas specializuotais integriniais grandynais

Specializuoti pjezovaldikliai – integrinės grandinės, t.y. IC arba lustai, angliškai vadinami (COTS – angl. *commercial off-the-shelf*). Šie 2.2 paveiksle pateikti lustai yra mažiausio galimo dydžio valdikliai skirti valdyti pjezoelektrines pavaras, todėl juos galima integruoti į praktiškus, mažus arba mažai vietos turinčiuose įrenginiuose ar pavarose. Sparčiai auganti šių integrinių grandynų rinka yra technologijų, kurios stimuliuoja lėtėjimo ir judesio pojūčius (angl. *haptics*). Dažniausiai naudojamas lėtėjimo sprendimas yra vibravimo funkcija mobiliajame telefone. „Haptics“

dažniausiai vyrauja išbalansuoti varikliai ir linijinio rezonanso pavaros, pagrįstos elektromagnetine technologija. [3]



2.2 pav. Integrinio grandyno mikroschema BOS1901 [17]

Pastaruoju metu pjezoelektrinės pavaros tapo patrauklia alternatyva dėl didelio energijos vartojimo efektyvumo, didesnio pralaidumo, puslaidininkinės technologijos ir galimybės valdyti sprendimus (angl. *authority control*). Dėl mažo dydžio, svorio ir šilumos sklaidos nešiojamiems įrenginiams naudojama IC/lusto stiliaus stiprintuvai. Šie lustai yra tiesiogiai integruojami į įrenginio plokštes ir įprastai veikia prie 3,3 – 5 VDC įvesties įtampos. Tačiau yra reikšmingas šių lustų trūkumas – apribojama maksimali galia. Kadangi IC yra maži, jie neturi fizinės įrangos, reikalingos didelei įtampai generuoti, jų dydis taip pat riboja įrenginio gebėjimą išsklaidyti šilumą, todėl reikia riboti įrenginio išvesties galią. [3]

2.1.3. Valdymas stiprintuvų moduliais

Stiprintuvo modulis naudojamas, kai yra reikalingas mažas dydis, bet kartu reikia ir daug galios. Šie stiprintuvai dažnai naudojami sintetinėms reaktyvinėms pavaroms, kurios yra naudojamos automobiliuose, sunkvežimiuose ar lėktuvuose, kur vieta ir svoris yra vienas iš svarbių kriterijų. Šiems stiprintuvų moduliams užmaitinti įprastai reikia nuolatinės srovės maitinimo šaltinio pavyzdžiui 12, 24 arba 48 VDC, todėl jie puikiai tinka naudoti automobiliuose ar kosmoso įtaisuose, kur nuolatinė įtampa yra pagrindinis maitinimo šaltinis. Moduliniai stiprintuvai yra paprastos išvaizdos (2.3 paveikslas), sudaryti iš atvirų grandynų plokščių, laidų ir šilumos sklaidos elementų. [3]



2.3 pav. QBS-234 stiprintuvo modulis [18]

2.1.4. Maitinimas iš nuolatinės įtampos šaltinio

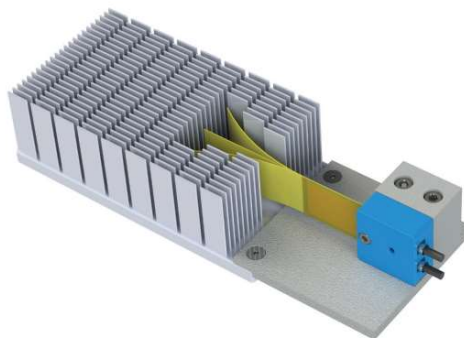
Dauguma pjezoelementų valdymo programų, tokių kaip garsiakalbiai, jutikliai, ventiliatoriai yra valdomi pastoviu arba kintamu dažniu, todėl ir įrenginys vibruoja į vieną arba į kitą pusę, sukurdamas jėgą, judesį arba garsą. Nemažai įrenginių, kuriose pjezoelementas yra valdomas, kad būtų tam tikroje padėtyje, pavyzdžiui pneumatinis vožtuvas. Vienintelės galimos vožtuvo būsenos gali būti arba „atidaryta“ arba „uždaryta“. Tokias dviejų būsenų operacijas galima atlikti naudojant nuolatinės srovės maitinimo šaltinį. Kai nėra maitinimo pjezoelementas yra natūralios - pradinės būsenos, pajungus nuolatinės srovės maitinimo šaltinio signalą, pjezoelementas įsitemps ir deformuosis, dėl kurio pasieks antrąją būseną. Šis nuolatinės srovės maitinimo signalas gali būti maitinimo blokas (2.4 paveikslas), baterija, sistemoje esanti NS įtampa arba sukurta naudojant įtampos stiprintuvą. [3]



2.4 pav. Impulsinis nuolatinės srovės maitinimo šaltinis [19]

2.1.5. Maitinimas iš kintamosios įtampos tinklo

Maitinimo iš tinklo būdas dažnai yra neįvertinamas. Tinklo maitinimas gali būti naudingas valdant pjezoelektrinį pavarą tais atvejais, kai pavaros dažnis ir amplitudė nėra svarbūs arba, kai pjezoelektrinė pavara yra taip sukurta, kad ji veiktų tiesiogiai iš tinklo. Tokiu principu yra sudarytas pjezoelektriniuose ventiliatorius (2.5 paveikslas), kuriame pjezokeramika yra pajungiamą į tinklą, kadangi tinkle yra teigiama ir neigiama amplitudė (angl. *peak to peak*) plokštelė švytuoja į vieną ir į kitą pusę pradinės būsenos atžvilgiu. Jungiant į tinklą rekomenduojama į grandinę įtraukti srovės ribojančią įrangą arba saugiklį, nes tinklo elektra gali turėti įtampos šuolių. [3]



2.5 pav. PiezoFlo ventiliatorius, maitinamas iš elektros tinklo [20]

2.2. Parametrų apžvalga renkantis stiprintuvą

Stiprintuvai yra pritaikyti naudoti kartu su sukurta sistema, todėl svarbu suprasti pagrindinius parametrus ir kaip jie paveiks pjezoelektrinio įrenginio veikimą ir kartu sudarytą sistemą. Žinant tokius parametrus kaip: išvesties ir įvesties įtampa, išvesties ir įvesties srovė, dažnį, triukšmus ir t. t. galima lengviau parinkti tinkamą stiprintuvą. Taip pat svarbu suprasti pagrindines pjezoelektrinio įrenginio specifikacijas: talpą, dažnį ir įtampą – tai tiesiogiai daro įtaką srovei ir galiai. [3]

2.2.1. Išvesties ir įvesties įtampa

Išvesties įtampa yra elektrinio signalo įtampos diapazonas, kuris įprastai yra perduodamas pjezo elementui valdyti. Įprastai pjezoelementų stiprintuvų išvesties įtampa yra nuo 100 V iki 200 V, didesnė įtampa įprastai būna naudojama didesnėms ir galingesnėms pavaroms valdyti. Kad pavara vibruotų reikia, kad stiprintuvas valdytų pavarą teigiama ir neigiama įtampa. Stiprintuvai įprastai nurodo veikimo įtampos diapazoną nuo 0 – 200 V arba +/- 100 V, šie diapazonai yra lygiaverčiai, dėl nuolatinės srovės poslinkio. Tai yra susiję su signalo amplitude, kuri apibūdinama kaip maksimumas (angl. *peak*). Arba atstumas nuo vidurio taško iki aukščiausio signalo taško ir vidurio taško žemiausio signalo taško (angl. *peak to peak*). [3]

Įvesties įtampa yra įtampos režis skirtas valdymo signalui. Norint valdyti pjezoelektrinį įrenginį per stiprintuvą, pirmiausia reikia į stiprintuvą paduoti valdymo signalą. Įvesties signalas, neturi viršyti galimos stiprintuvo įvesties įtampos ir būti jo įtampos įvesties diapazone (dažniausiai būna nuo 0 V iki 5 V).

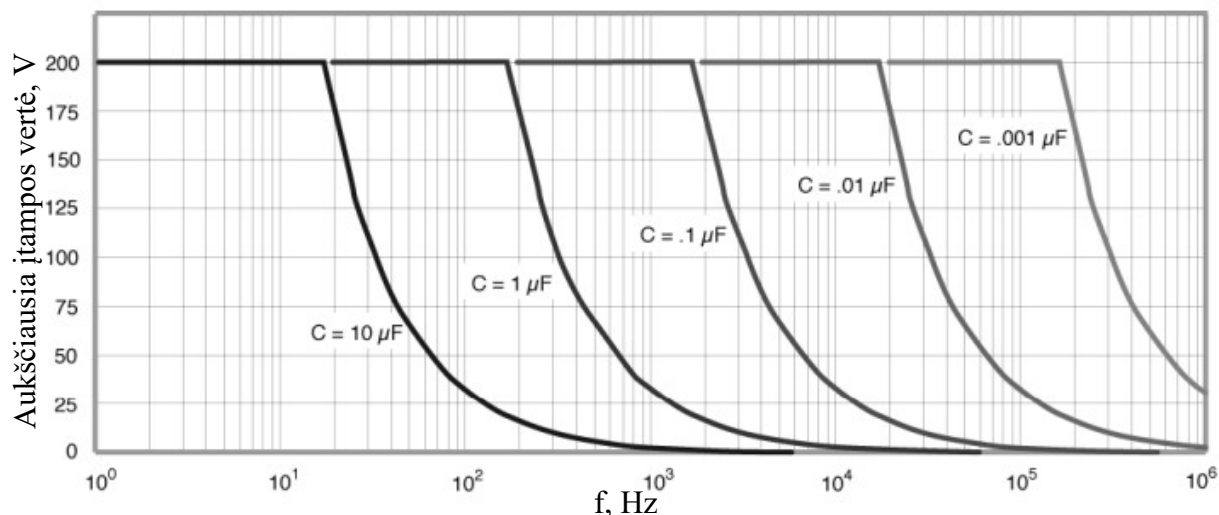
Įtampos stiprinimas yra išvesties ir įvesties įtampos santykis, matuojamas voltais vienam voltui (V/V). Stiprintuvų veikimas pagrįstas įvesties įtampos keitimu į didesnę įtampą. Šis įtampos stiprinimas paprastai yra tiesinis ir fiksuotas. Veikiant aukštesnėms įtampos ir artėjant prie įrangos ribų, stiprinimas gali būti netiesinis ir gali atsirasti svyravimų priklausomai nuo pavaros dažnio, temperatūros ar kitų parametrų. [3]

2.2.2. Išvesties srovė

Stiprintuvo srovės maksimali išvesties srovė turi būti didesnė už didžiausią pjezoelektrinės pavaros galimą srovę. Aukštos įtampos stiprintuvai, dažnai būna mažos išvesties srovės (<1 A), pjezoelektrinėms pavaroms reikia labai mažos srovės. Pavyzdžiui „PiezoFlo PFN-1011“ pjezoelektrinio ventiliatoriaus didžiausia srovė yra 3.3 mA. Įprastai vienas stiprintuvas turės užtektinai galios, kad būtų galima valdyti kelias pavaras. Pjezoelektrinės pavaros yra kaip kondensatoriai, todėl srovės suvartojimas yra proporcingas įtampai ir dažniui. Daugiau srovės pjezoelektriniai keitikliai sunaudoja tuo atveju kaip veikia rezonanso dažniu arba artimu jo dažniui. [3]

2.2.3. Dažnis

Tai pavaros dažnių diapazonas, kuriame gali veikti stiprintuvas. Dažnai dažnis apsunkina stiprintuvą. Daugeliu atvejų naudingas dažnis yra mažesnis už nurodytą absoliutųjį dažnį ir riboja išvesties galią ir veikiamos apkrovos talpą. 2.6 paveiksle pateiktos didžiausios įtampos ir skirtingo dažnio diapazono kombinacijos, skirtingoms EPA-104 stiprintuvo apkrovos talpoms [3]



2.6 pav. EPA-104 stiprintuvo skirtingos didžiausios įtampos ir dažnio diapazono kombinacijos [21]

2.2.4. Maksimali galia

Atsižvelgiant į tai, kad nors ir gali stiprintuvas atitikti visus nurodytus keliamus reikalavimus, tačiau veikiant stiprintuvas gali jų visų vienu metu ir nepalaikyti. Stiprintuvuose nurodoma didžiausia galia, kurią gali perduoti. Ši gali susijusi su pavaros dažniu, įtampa ir pjezoelektrinio įtaiso talpa. Kad stiprintuvas galėtų perduoti pakankamai galios pjezoelektriniui elementui jis turi atitikti visus stiprintuvo parametrus vienu metu. [3]

2.2.5. Elektrinė talpa

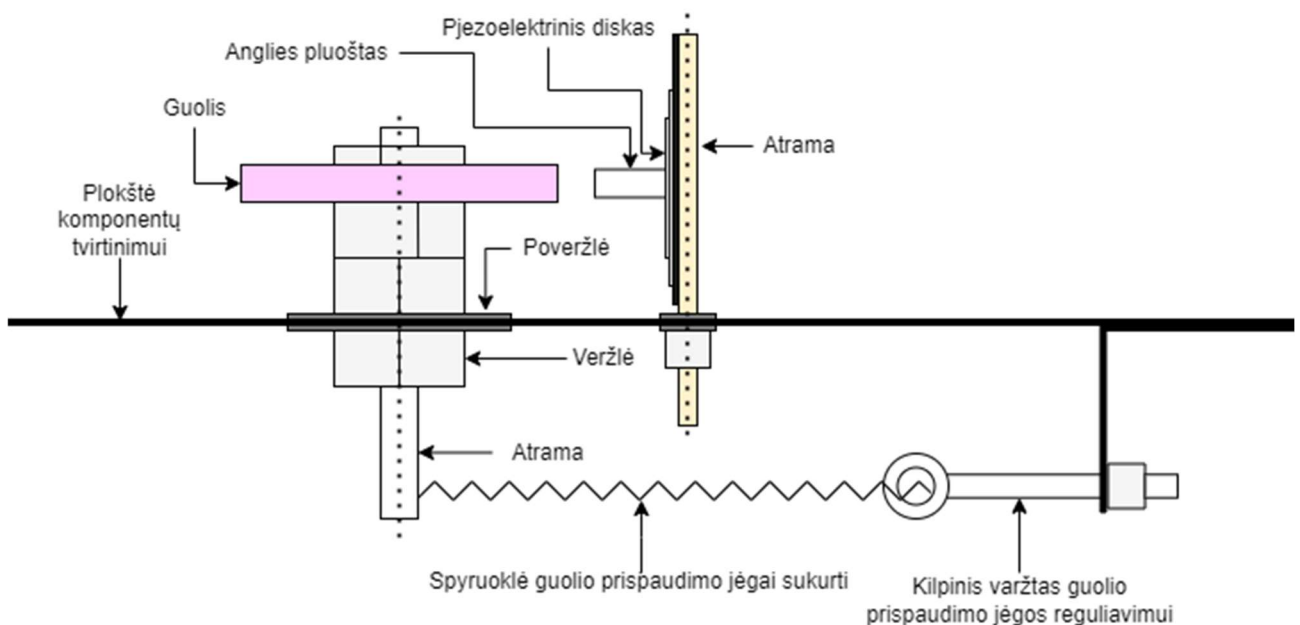
Talpa yra pagrindinė pjezoelektrinių pavaros įtaisų elektrinės varžos charakteristika, nuo kurios priklauso jų vartojamos srovės kiekis. Daugumos pjezoelektrinių pavaros mechanizmų talpa svyruoja nuo 10 nF iki 500 nF. Talpa yra daugelio pagrindinių pjezoelektrinių pavaros savybių rodiklis. Didesnių pjezoelektrinių pavarų talpa yra didesnė, taip pat jos pasižymi didesniu srovės suvartojimu tam pačiam įtampos signalui ir įprastai didesniu poslinkiu, priklausomai nuo formos. Naudojant skirtingus pjezoelektrinius įtaisy, talpa smarkiai nesikeičia, tačiau dauguma įprastų pjezo gedimų yra žymus talpos sumažėjimas, todėl būtent talpa yra rodiklis identifikuojantis gedimą. [3]

2.3. Precizinės pjezoefekto pavaros maketo sudarymas

Pateikiama sudaryto pjezoefekto pavaros maketo: konstrukcinės, blokinės, principinės elektros schemos, apžvelgiami pagrindiniai sistemos elektronikos komponentai, jutikliai, pavaros veikimo principas.

2.3.1. Konstrukcinė dalis

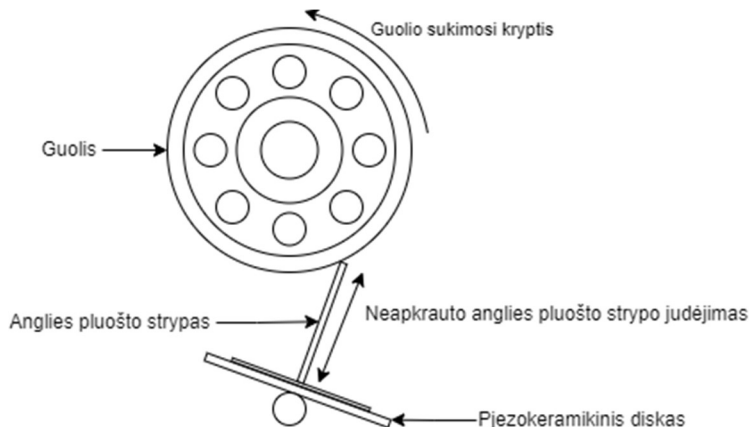
Mechaninės dalies kokybė, patvarumas ir tikslumas yra vienas iš pagrindinių dalykų konstruojant precizinės pjezoefekto pavaros maketą. Ant pjezokeramikinio disko pritvirtintas anglies pluošto strypas, kuris remiasi į guolį, turi kuo tiksliau priglusti prie guolio. Visa konstrukcija turi būti standi ir tinkamai pritvirtinama, kad tikslumas ir smūgio jėga, skirta sukimo momentui sukurti, būtų kuo didesnė. Todėl šis eksperimentinis modelis turi būti pagamintas tiksliai ir kokybiškai. Svarbiausi mechaninės dalies kriterijai yra: pritvirtino ant pjezokeramikinio disko anglies pluošto strypo kampas ir guolio prispaudimas prie anglies pluošto (turi būti spaudžiamas nei per stipriai, nei per silpnai). Pjezokeramikinis diskas ant kurio pritvirtintas anglies pluošto strypas turi būti tvirtai priveržiamas, o guolis kuris sumontuotas ant atramos, turi būti nuolat spaudžiamas strypo link, sukuriant atramai prispaudimo jėgą.



2.7 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros konstrukcinė schema

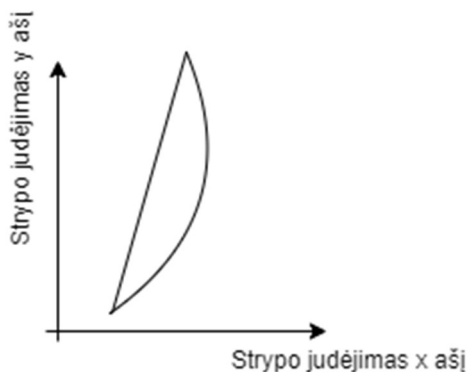
Iš 2.7 paveiksle pateiktos konstrukcinės schemos, matyti, kad atramai ant kurios yra sumontuotas guolis prikabinama spyruoklė įtvirtinta prie kilpinio varžto su veržle, kuri leidžia keisti spyruoklės įtempimą, taip sukuriant keičiamą guolio prispaudimo jėgą. Ši konstrukcijos dalis eliminuoja strypo nusidėvėjimą, ir guolio laisvumą, nes pats guolis ir atramos nėra preciziškos konstrukcijos ir turi minimalius laisvumus. Pjezokeramikinis diskas yra pritvirtinamas dviem

metalinėmis plokštėmis, tarp kurių yra sumontuotas minkštas pagrindas, kad būtų kuo didesni kvazistatiniai virpesiai, tvirtinamojoje plokštėje padaroma, kuo didesnė skylė, o pjezokeramika parenkama kuo didesnio disko. Visi komponentai, montuojami ant konstrukcinės plokštės, kad būtų gaunama pjezoelektrinio efekto pavara.



2.8 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros konstrukcija iš viršaus

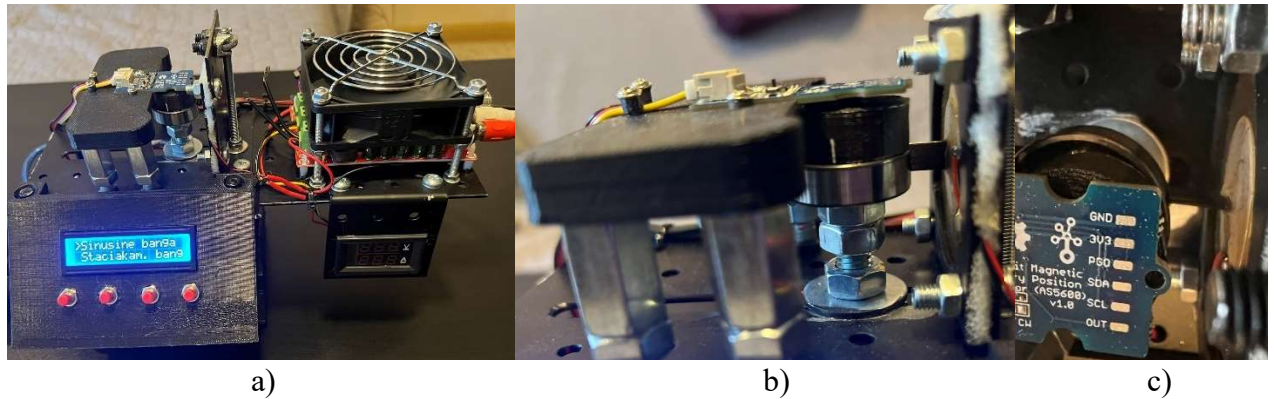
Ant atramos sumontuoto pjezokeramikos disko ant, kurio priklijuotas anglies pluoštas - kampas (2.8 paveikslas) parenkamas, toks, kad sistema sukurtų sukamąjį momentą, kuris gebėtų guolį pasukti kuo lengviau, nebūtų guolis per stipriai ar per silpnai prispaudžiamas strypo. Kampo parinkimas svarbus, kad veikiant elektriniam laukui pjezokeramikinį diską, būtų sukuriamos deformacijos, kurios sukurtų sukimo momentą esant mažiausiai įtampai ir dažniui.



2.9 pav. Anglies pluošto strypo judėjimo trajektorija veikiant pjezoelektrinį diską pjezoelektriniam efektui

Atsižvelgus į antrą ir trečią paveikslus, bei atlikus bandymus su guolį sukančiu pjezokeramikiniu disku ant kurio pritvirtintas anglies pluošto strypas, matyti, kad nėra sukuriami atgaliniai sukimo judesiai. Kuriantis sukimo momentą pjezokeramikos diskas su strypu yra sumontuojami ne statmenai guoliui, todėl nematomi žmogui aukšto dažnio pjezoelektrinio efekto virpesiai anglies pluošto judėjimo trajektoriją išlenkia, kaip pavaizduota 2.9 paveiksle pateiktoje anglies pluošto judėjimo trajektorijoje. Kai pjezokeramikiniame diske sukuriamas pjezoelektrinis

efektas, keramika veikianti kvazistatiniame režime priklausomai nuo bangos tipo išsigaubia ir atremtas anglies pluošto strypas į guolį yra stumiamas, taip sukuriant sukimo momentą. Veikiant grįžtamai bangos dalies daliai, keramika išlinksta ir anglies pluoštas „neliesdamas“ guolio grįžta į pradinę padėtį. Kadangi pjezokeramika yra primontuota prie metalinės konstrukcijos, išlinkimas bus mažesnis nei išgaubimas.

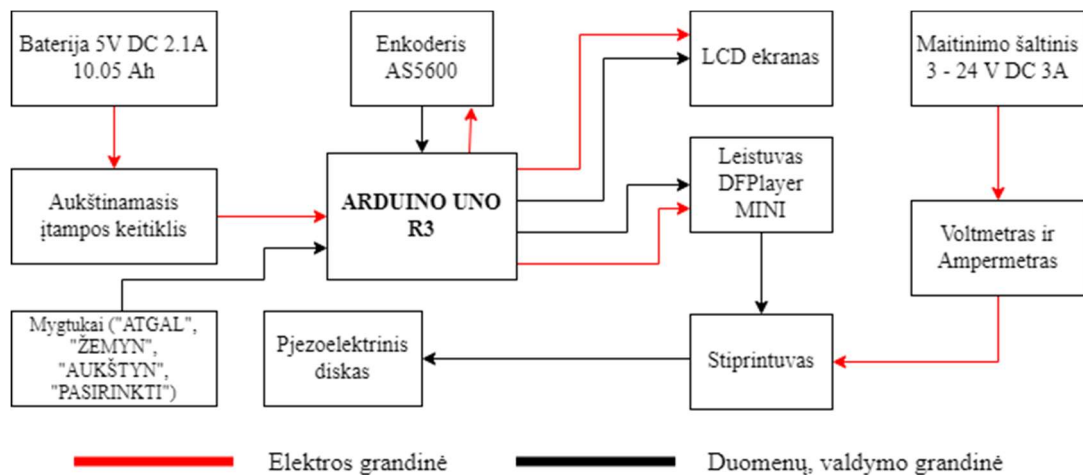


2.10 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo maketas: a) bendras maketo vaizdas; b) pjezokeramikinis diskas su pritvirtintu anglies pluoštu, guolis ant kurio diametriškai įmagnetintas magnetas, guolio padėčiai nustatyti, virš magneto padėties jutiklis AS5600; c) ant pjezo keramikos disko pritvirtinto anglies pluošto atramos kontaktinis atramos kampas į guolį

Pagal konstrukcines schemas sudarytas mechaninis precizinės pjezoelektrinės pavaros modelis (2.10 paveikslas). Pagrindiniai konstrukciniai elementai yra metalo gaminiai, kurie tarpusavyje susitvirtina ir suteikia sistemai standumą, bei tvirtą konstrukciją. Visiems elektronikos komponentams sutalpinti ir pritvirtinti, panaudotos sumodeliuotos ir 3D spausdintuvu atspausdintos detalės, kurios ne tik atrodo estetiškai, tačiau prie jų yra pritvirtinami elektronikos įrenginiai, jutikliai. Visa tai sistemai suteikia paprastesnį tyrimo maketo eksploatavimą, naudojimą ir patvarumą.

2.3.2. Elektroninė dalis

Sudarytos precizinės pjezoelektrinės pavaros pagrindinis valdymo įrenginys yra „ARDUINO UNO R3“, prie valdiklio prijungta padėties jutiklis AS5600, LCD ekranas, mygtukai, leistuvas skirtas signalui simuliuoti. Valdiklio maitinimo grandinei naudojama baterija su aukštinamuoju įtampos keitikliu, o stiprintuvo maitinimui parinktas kontroliuojamas maitinimo šaltinis 3–24 V DC. Stiprintuvo įvesties įtampai ir srovei matuoti naudojamas voltmetras ir ampermetras. Leistuvo signalui sustiprinti naudojamas įtampos ir srovės stiprintuvas, kuris gauta signalą sustiprina. Tokios sistemos struktūra pateikta 2.11 paveiksle.



2.11 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros funkcinė schema

Pagrindinis precizinės pjezopavaros valdymo komponentas pasirinktas vienas iš populiariausių atvirojo kodo mikrokontrolerių „Arduino UNO R3“ valdiklis 2.12 paveikslas.



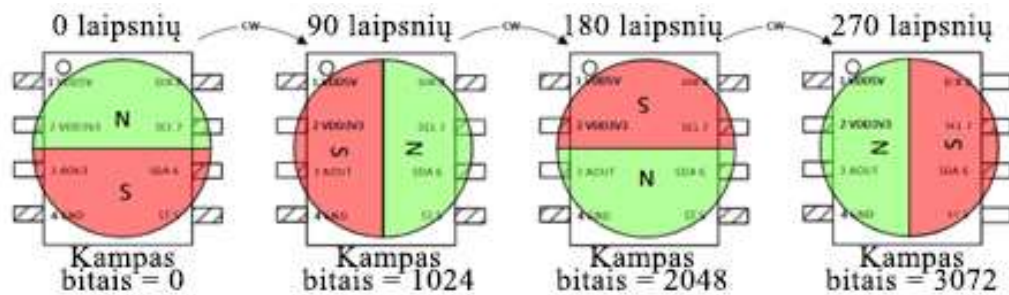
2.12 pav. Arduino UNO R3 valdiklis

Guolio padėčiai nustatyti naudojamas AS5600 12 bitų padėties jutiklis (2.13 paveikslas). Padėties jutiklis nustato guolio padėtį arba kampą, taip leidžia mikrovaldikliui kontroliuoti, valdymo signalą, kai yra pasiekiamas nustatytas laipsnių kampas, valdymo signalas nutraukiamas. Padėties jutiklis yra įrengiamas virš guolio ant kurio yra sumontuojamas diametriškai įmagnetintas magnetas, skirtas padėties jutiklio laipsniams ir padėčiai nustatyti. Šis AS5600 sukimosi padėties jutiklis yra lengvai programuojamas, yra bekontaktis. Jutiklis aptinka magnetinio lauko pokyčius ir sugeneruoja signalus, kuriuos apdoroja jutiklio elektronika, tuomet apdorotas magnetinio lauko pokytis paverčiamas į skaitmeninį signalą, kuris atitinka pasukimo kampą ar poziciją.



2.13 pav. 12 bitų padėties jutiklis AS5600 jutiklio bendras vaizdas

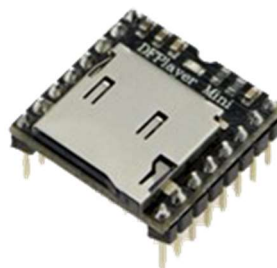
Padėties jutiklis sukonstruotas taip, kad pašalina bet kokius homogeninius išorinius pasklidusius magnetinius laukus ir jų įtaką. Palaiko I²C komunikavimo sąsają, padėties jutikliui eina užprogramuoti nulinį kampą bei didžiausią leistiną kampą.



2.14 pav. Padėties jutiklio rezoliucija esant skirtingoms magneto padėtimis

Pavara suksis tik į vieną pusę, todėl tyrimo patogumui parinktas 360 laipsnių jutiklis, o kadangi jis nėra kontaktinis, tai nėra sudaromas pasipriešinimas pavara, nes pjekzokeramikos disko kuriamas inercijos momentas nėra didelis. Todėl, atsiradus papildomai pasipriešinimo jėgai, yra sunkiau sukurti sukimo momentą.

Valdymo signalui generuoti naudojamas DFP leistuvas (2.15 paveikslas). Į leistuvą įstatoma atminties kortelė, į kurią yra įkeliami atitinkamo dažnio ir bangos valdymų signalai. Bangos tipai gali būti: sinusinė, kampinė, trikampė ir pjūklinė. DFP leistuvą valdo Arduino valdiklis. Leidžiamas valdymo signalas priklauso nuo pasirinkto, o sustabdymas priklauso nuo užduoto kampo ir esamos padėties signalo, kuris gaunamas iš padėties jutiklio.



2.15 pav. „DFPlayer mini“ bendras leistuvo vaizdas

Šis modulis palaiko MP3 ir WMV formatą, gali būti jungiamas tiesiai į garsiakalbį, taip pat gali būti naudojamas su valdikliu ar be jo, tačiau šiuo atveju leistuvą valdomas RX/TX duomenų sąsaja. Pagrindiniai leistuvo parametrai:

- Įvesties įtampa: 3,2 – 5 VDC;
- Palaikomi dažniai (kHz): 8/11,025/12/16/22,05/24/32/44,1/48;
- Išvestys: 24 bitų DAC, dinaminio diapazono palaikymas 90 dB, SNR palaikymas 85 dB;
- Failų sistemos: FAT16, FAT32 (didžiausia 32 GB kortelė);
- Valdymas: I/O, serijinis, AD;
- Talpa: 100 aplankalų ir 250 garso įrašų;
- Išvestyje formatuoja 3 W signalą.

Valdymo signalui sustiprinti naudojamas aukštos galios ir elektrinio naudingumo D – klasės stereo garso stiprintuvo modulis TDA7498 (2.16 paveikslas). Jo išvesties galia 2 x 100 W. Įmontuoti DIP jungikliai leidžia valdyti stiprinimą jau po sustiprinto signalo, o potenciometras leidžia valdyti valdymo signalo galią.

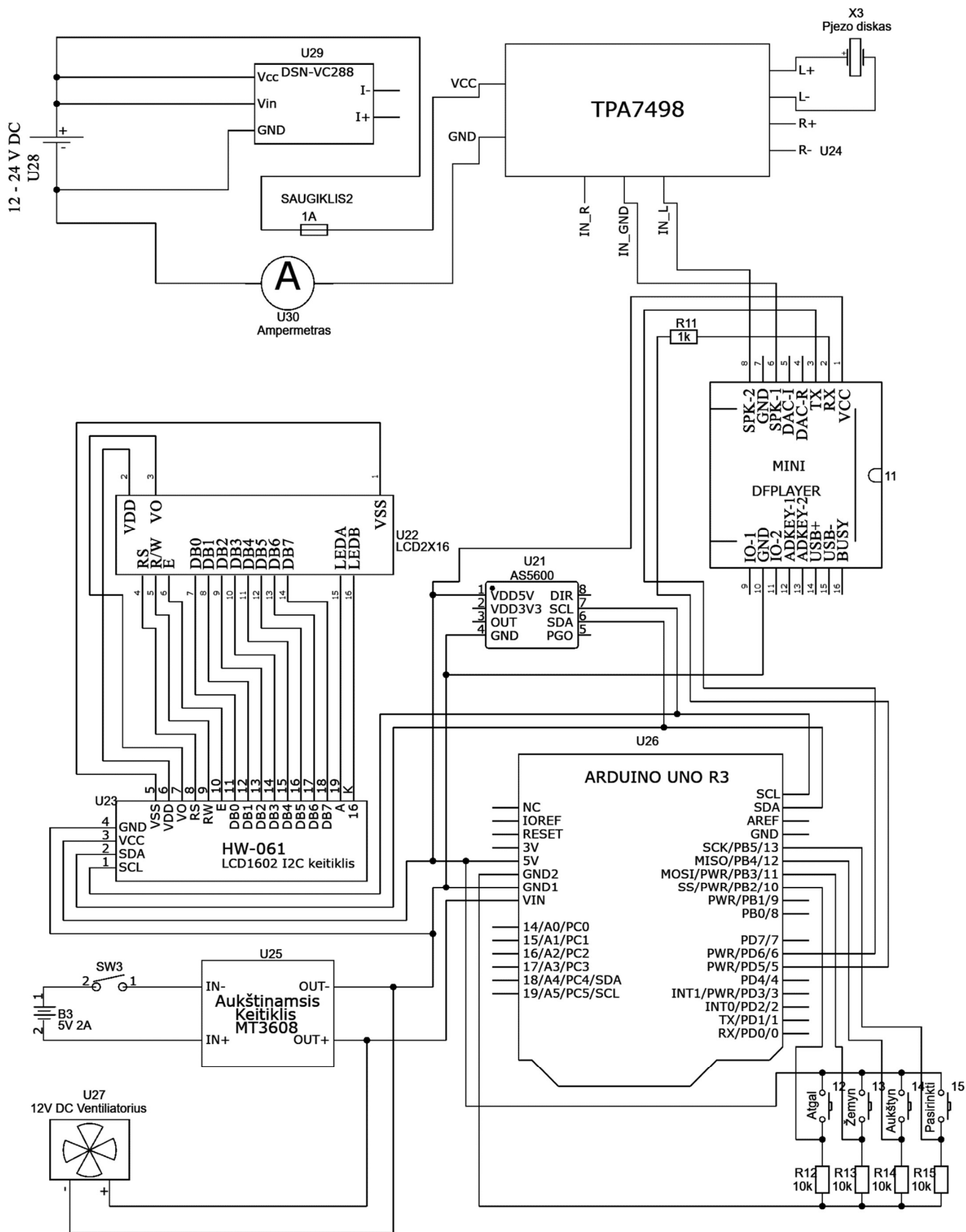


2.16 pav. TDA7498 D – klasės garso stiprintuvas

Pagrindiniai TDA7498 D – klasės techniniai duomenys ir savybės:

- Įvesties maitinimo įtampa: 12-32 V DC;
- Išvesties galia esant 8 omų garsiakalbiams: 2 x 100 W;
- Signalų dažnis: 18 Hz – 100 kHz;
- Turi apsaugą nuo viršsrovio.

Kad tiriamąjį modelį būtų lengviau iširti informacijos atvaizdavimui panaudotas LCD 16x2 rezoliucijos ekranas, ant kurio yra išvedami padėties jutiklio rezultatai, pasirenkami valdymo signalo tipai, galia ir nustatomas norimas pasukti kampas. Mygtukai panaudoti paprasti – be fiksacijos. Mygtukai yra jungiami su varžomis, kad eliminuoti elektromagnetinius triukšmus. Įvesties srovei ir įtampai matuoti naudojamas voltmetras ir ampermetras. Visi komponentai yra sujungiami į vieną bendrą sistemą, šios sistemos elektrinė principinė schema pavaizduota 2.17 paveiksle.



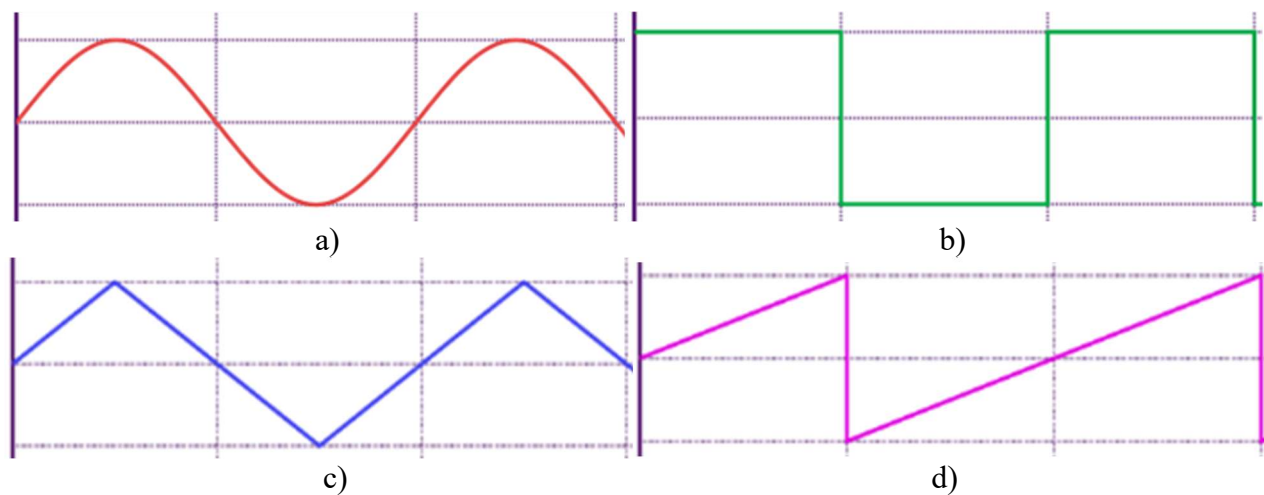
2.17 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros maketo blokinė schema

2.3.3. Valdymo signalo banga

Apžvelgiamos keturios nagrinėjamos bangų formos, kuriomis gali būti valdoma sistema. Šios formos yra labai svarbios generuojant valdymo signalą – garsą, taip sukuriant virpesius reikalingus sukimo momentui. Nagrinėjamosios bangos yra: sinusinė, stačiakampė, trikampė, pjūklo formos bangos (2.18 paveikslas):

- sinusinė banga: yra periodinė banga, kuri lygiagreti ašiai ir pasižymi sinusoidės forma. Sinusinė banga aprašoma dvejais pagrindiniais dydžiais: amplitudė ir dažnis;
- stačiakampė banga: yra signalas, kurio iškilimo ir nusileidimo laikas lygus. Tai reiškia, kad signalas yra tiesus – stačiai krenta ir kyla;
- trikampė banga: yra signalas, kuris turi formą, kuri primeną trikampį. Signalas palaipsniui didėja iki tam tikros aukščiausios vertės ir tada palaipsniui mažėja iki pradinės vertės;
- pjūklinė banga: yra signalas, kuris turi aukštos ir žemos dažnio dalių kombinaciją, jis yra sudarytas iš aukštesnių ir žemesnių signalų, kurie yra iškerpami iš visos bangos.

Valdymo signalo bangos yra formos, kurios kartojasi nustatytame periode, priklausomai nuo parametrų: bangos ilgio, dažnio, periodo ir amplitudės. Visi šie parametrai pjezokeraminiame elemente sukuria virpėjimą (garsą). Kuo didesnis dažnis, tuo dažnesnis pjezokeramikos virpėjimas.



2.18 pav. Valdymo signalo bangos: a) sinusinė; b) stačiakampė; c) trikampė; d) pjūklinė

2.3.3.1. Eksperimentinė valdymo signalo be stiprintuvo analizė

Sudarius maketą prieš tiriant jį kaip precizinę pjezoelektrinę pavarą, pirmiausia ištiriamos valdymo signalo bangos. Atsižvelgiama į tai, kad valdymo signalo bangos gali būti iškraipytos leistuvo ir gali būti netinkamai sugeneruotos, yra tiriamos iš įrašo kompiuteryje ir iš įrašo garso leistuve, tačiau abejais atvejais, tiriamas signalas dar prieš garso stiprintuvą.



2.19 pav. Valdymo signalo bangos analizės aplinka, kai analizuojamas signalas, be garso stiprintuvo

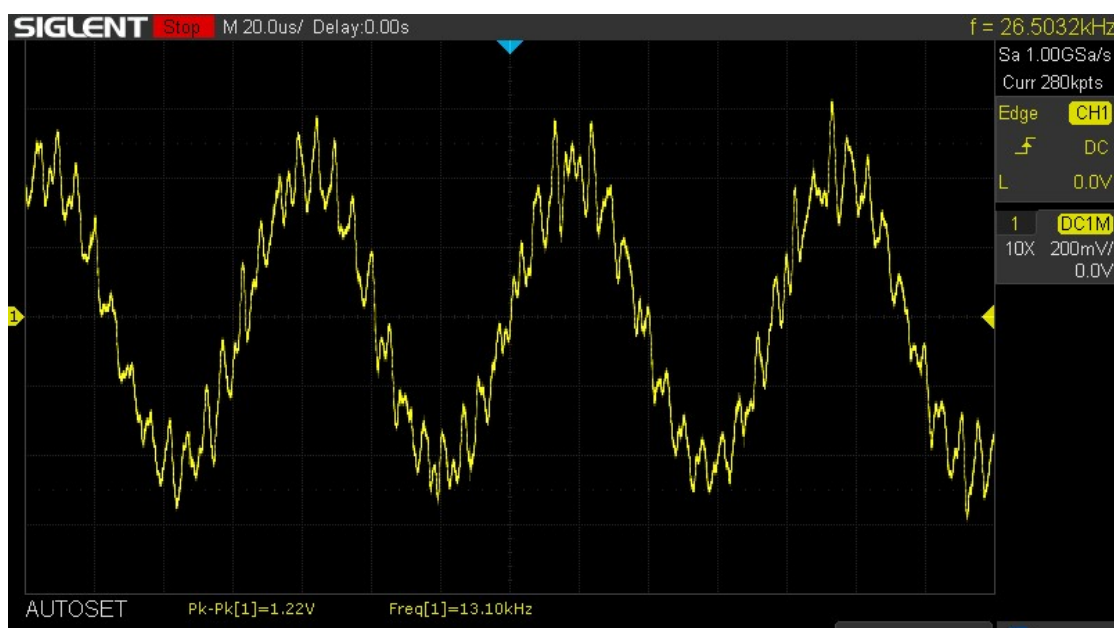
Bandymams atlikti naudojamas kompiuteris ir garso leistuvai per, kuriuos yra leidžiami sugeneruoti bangos signalai ir atvaizduojami per oscilografą. Tokiu būdu išsiaiškinama, ar garso signalai yra iškraipomi, kokios yra įtampos amplitudės ar tinkamas dažnis išvedamas. 2.19 paveiksle pateikta valdymo signalo tyrimo aplinkos nuotrauka.

2.2 lentelė. Sinusinės bangos kokybės analizės preliminarūs duomenys iš leistuvo ir kompiuterio

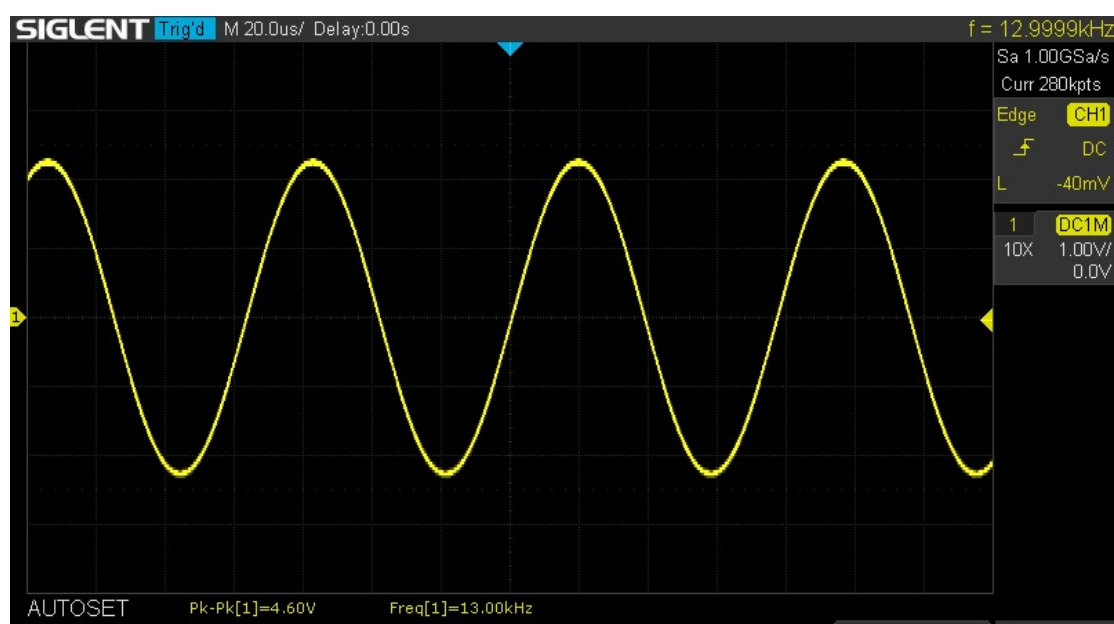
Dažnis, (kHz)	Bangos iškraipymai iš leistuvo	Bangos iškraipymai iš sugeneruoto įrašo
1	Yra	Nėra
3	Yra	Nėra
4	Yra	Nėra
5	Yra	Nėra
6	Yra	Nėra
7	Yra	Nėra
8	Yra	Nėra
9	Yra	Nėra
10	Yra	Nėra
11	Yra	Nėra
12	Yra	Nėra
13	Yra	Nėra

Iš pirmos 2.2 lentelės matyti, kad paduodamas sinusinis valdymo signalas iš sugeneruoto signalo triukšmų neturi, tačiau paleidžiant per patį leistuvą atsiranda ant sinusoidės įtampos šuoliai, tačiau pati periodo forma išlieka panaši į sinusoidės.

Iš 2.20 paveiksle pateiktų tų pačių 13 kHz sinusinės bangų signalų galima matyti, kad banga leista iš kompiuterio neturėjo nuokrypių, o banga leidžiama iš leistuvo turėjo nuokrypių nuo tiesios linijos. Matyti, kad įtampos amplitudės skiriasi, iš leistuvo leisto įrašo gaunama 1,22 V įtampa, o iš kompiuterio leistos sugeneruotos sinusinės bangos 4,60 V. Visų atliktų bandymų metu bangos iškraipymai buvo labai panašūs, iš leistuvo visi turėjo svyravimus, o iš kompiuterio leistų valdymo bangų signalai buvo, be nereikalingų triukšmų.



a)



b)

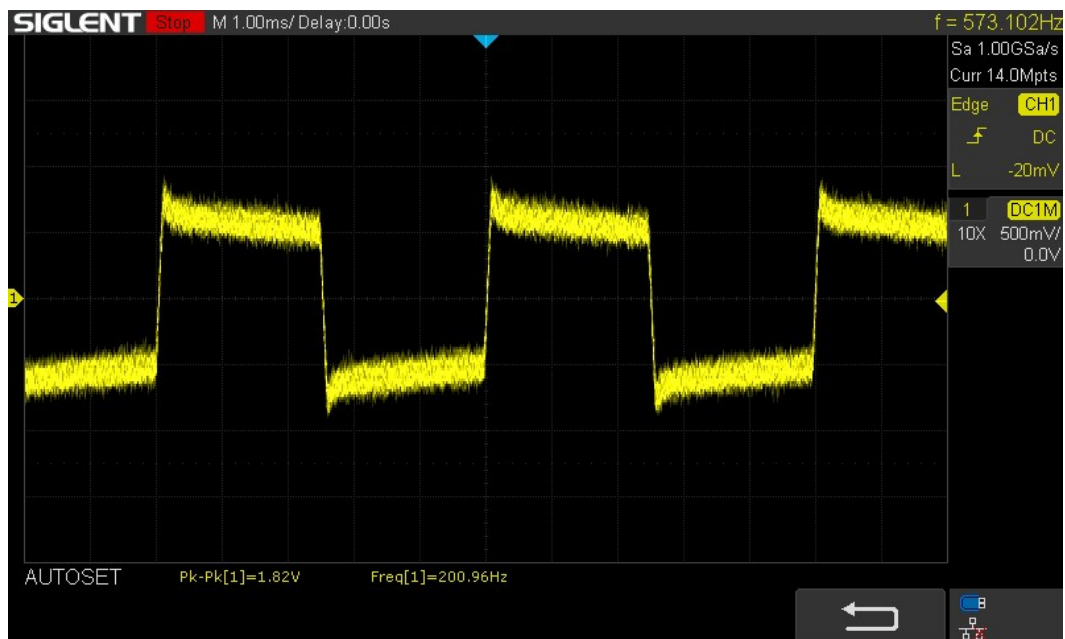
2.20 pav. Sinusinės bangos 13 kHz: a) iš leistuvo b) iš kompiuterio;

2.3 lentelė. Stačiakampės bangos kokybės analizės preliminarūs duomenys iš leistuvo ir kompiuterio

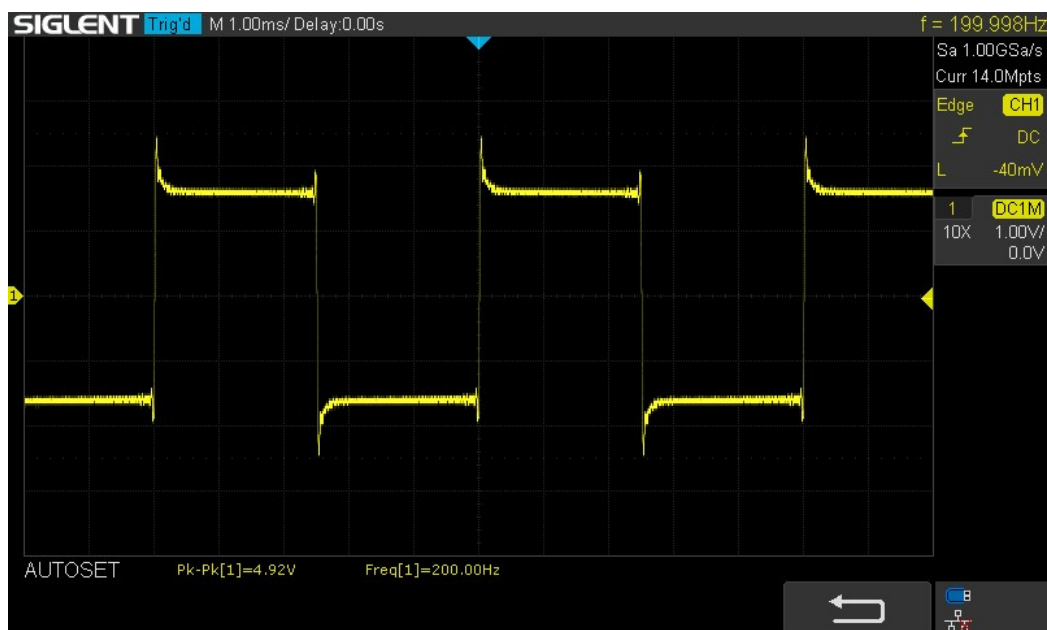
Dažnis, (kHz)	Bangos iškraipymai iš leistuvo	Bangos iškraipymai iš sugeneruoto įrašo
0.2	Yra	Yra
1	Yra	Yra
3	Yra	Yra
4	Yra	Yra
5	Yra	Yra
6	Yra	Yra
7	Yra	Yra
8	Yra	Yra
9	Yra	Yra
10	Yra	Yra
11	Yra	Yra
12	Yra	Yra

2.3 lentelėje pateiktos stačiakampės bangos analizės matyti, kad stačiakampė banga paleista iš leistuvo ir kompiuterio yra iškraipyta, galima manyti, kad banga nėra gerai sugeneruota, leistuvo ir kompiuterio techniniai parametrai negali jos atvaizduoti arba naudojama per mažai taškų.

2.21 paveiksle pateiktos iš leistuvo ir kompiuterio leidžiamos stačiakampės 200 Hz bangos. Matyti, kad leistuve leidžiama banga yra labiau iškraipoma, horizontalios ir vertikalios bangos signalo dalys nėra statmenos, tai yra vertikalios nėra vertikalios, o horizontalios nėra visai horizontalios, taip pat horizontalios signalo dalys turi labai daug triukšmų. Kompiuteriu paleistos stačiakampės bangos signalas turi menkų iškraipymų ties statmenais pakylimais ir nusileidimas, o horizontalios signalo bangos dalys turi triukšmų, tokie triukšmai gali atsirasti dėl signalo diskretizavimo. Lyginant valdymo signalo įtampos amplitudę, matyti, kad iš leistuvo leidžiama banga yra daugiau nei dvigubai mažesnės įtampos 1,82 V, o kompiuteriu leidžiamos bangos įtampa yra 4,92 V.

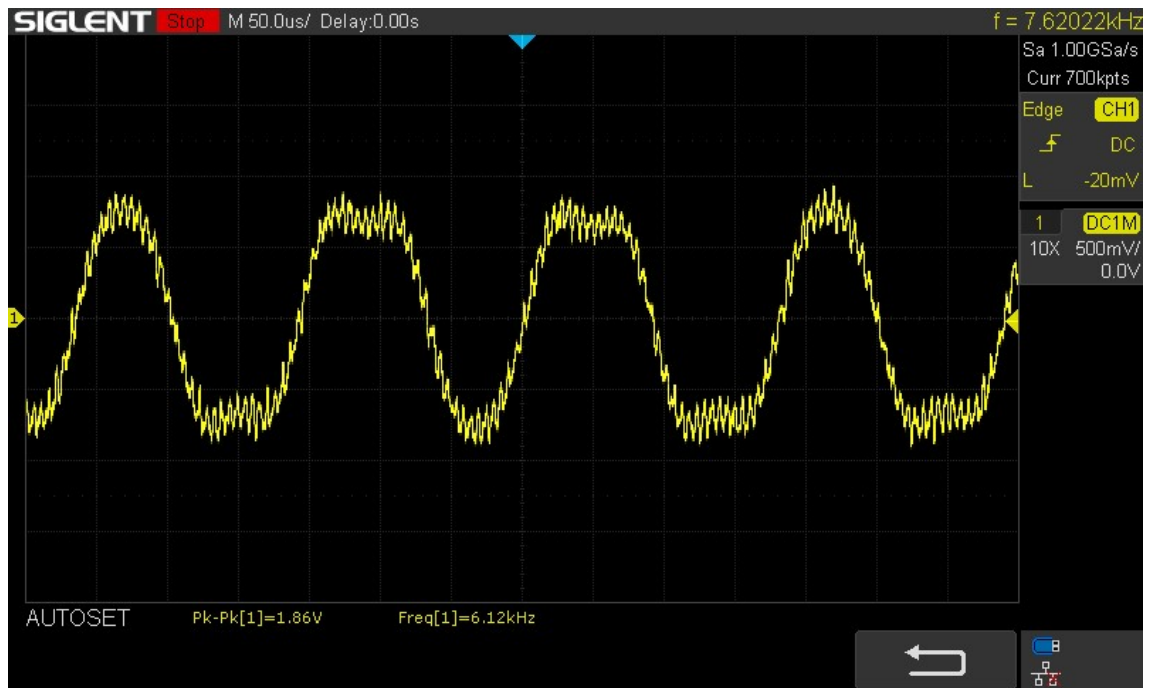


a)

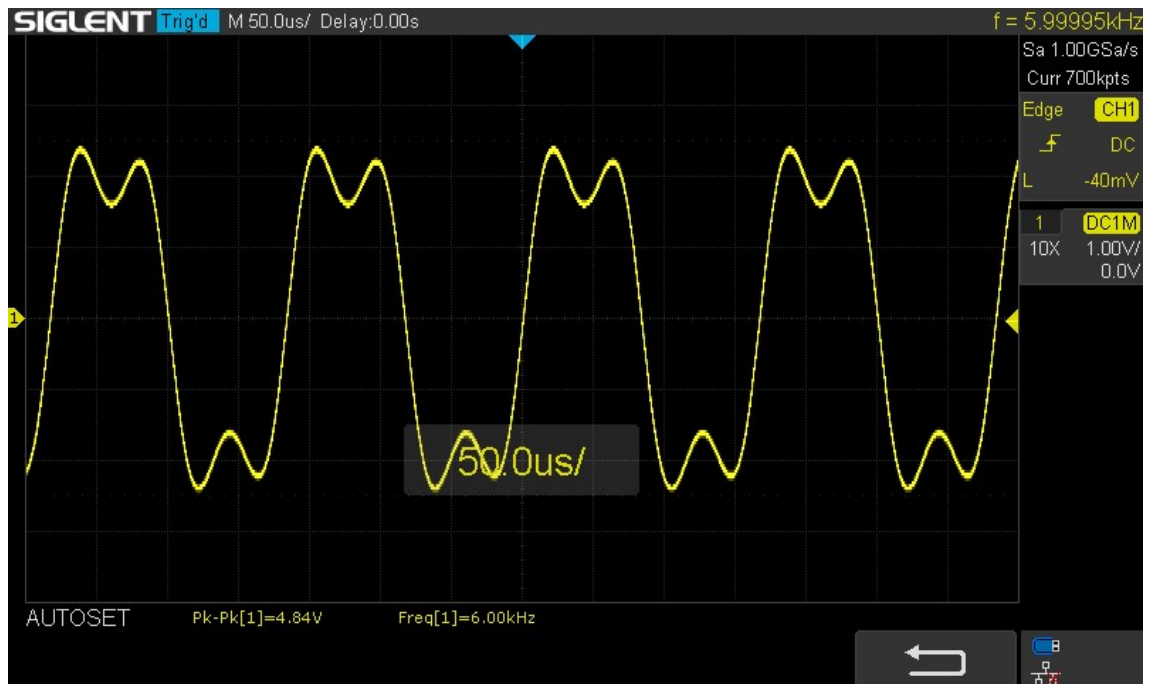


b)

2.21 pav. Stačiakampės bangos 200 Hz: a) iš leistuvo b) iš kompiuterio



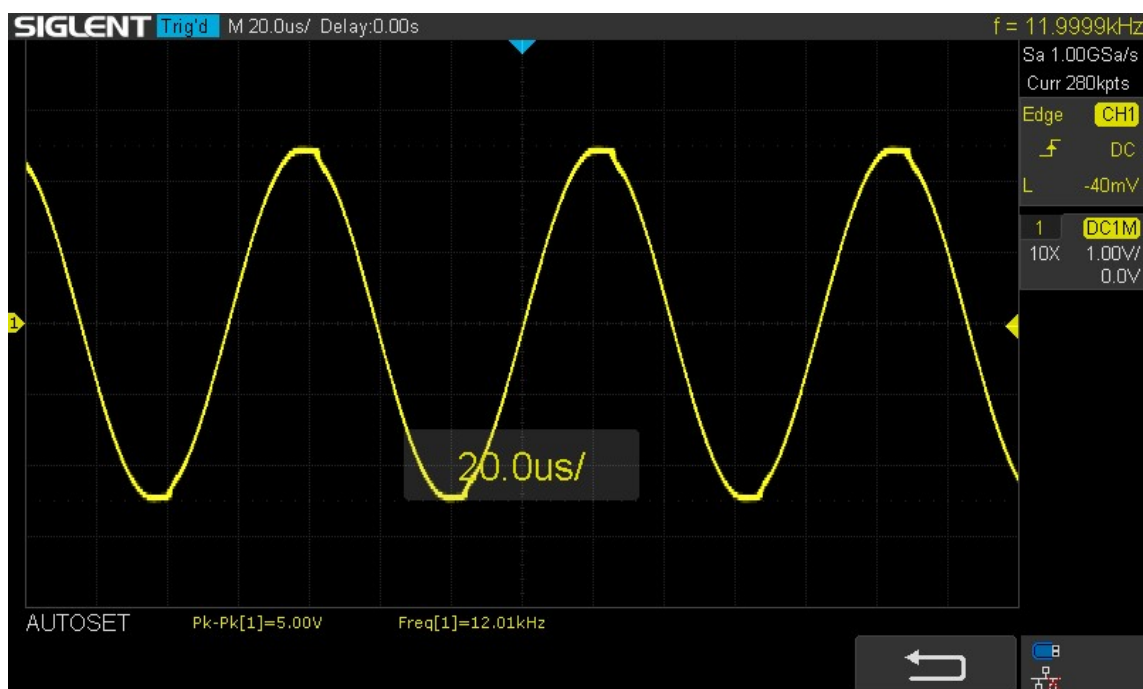
a)



b)

2.22 pav. Stačiakampės bangos 6 kHz: a) iš leistuvo b) iš kompiuterio

Kai stačiakampė banga yra 6 kHz dažnio, matyti, kad tampa nepanaši į stačiakampę bangą. Iš 2.22 paveiksle pateikto grafiko, leistuvo leidžiamos bangos svyravimai yra neharmoniški ir nenuspėjami, o iš kompiuterio leidžiamas bangos signalas nors ir yra nuspėjamas, tačiau nepanašus į stačiakampę bangą. Įtampos amplitudė yra leidžiant iš leistuvo 1,86 V, o iš kompiuterio 4,84 V.



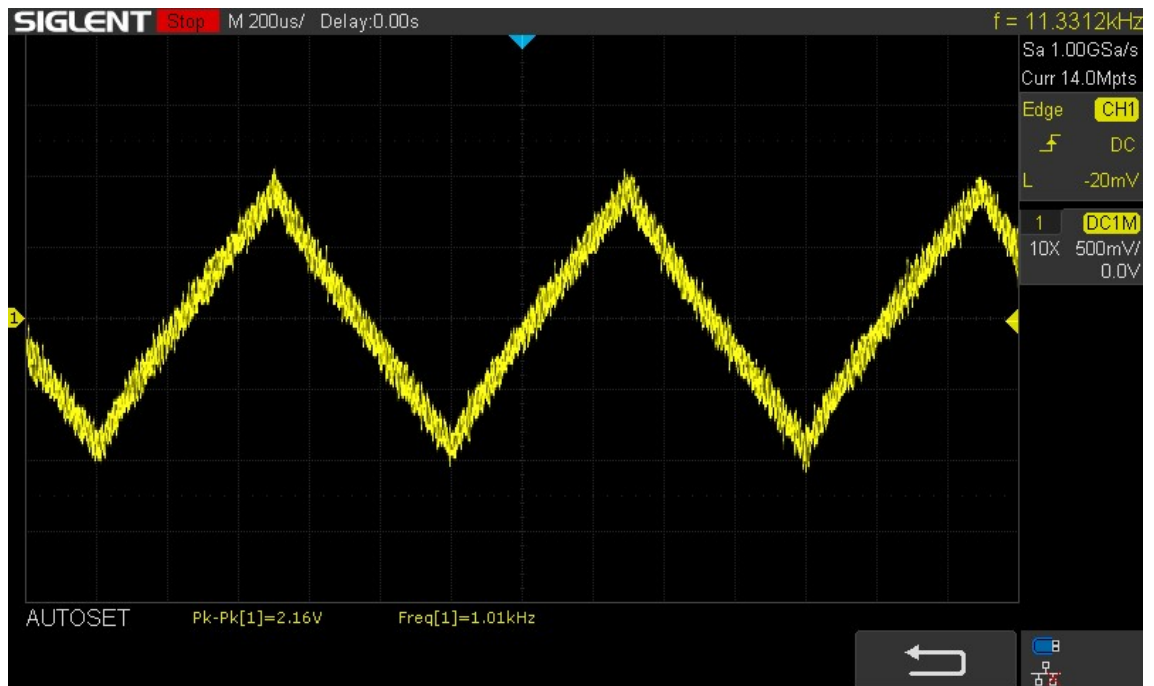
2.23 pav. Sugeneruota stačiakampė banga 12 kHz iš kompiuterio

Toliau didėjant dažniui, matyti, kad stačiakampė banga virsta panaši į sinusoidę (2.23 paveikslas), skirtumas tik tas, kad viršūnėse, tiek apačioje tiek ir viršuje yra menki iškrypimai, tačiau banga nėra stačiakampės formos. Matyti, kad kylant dažniui didėja ir bangos amplitudės įtampa, šiuo atveju leidžiamos iš kompiuterio bangos signalo įtampa yra 5,00 V.

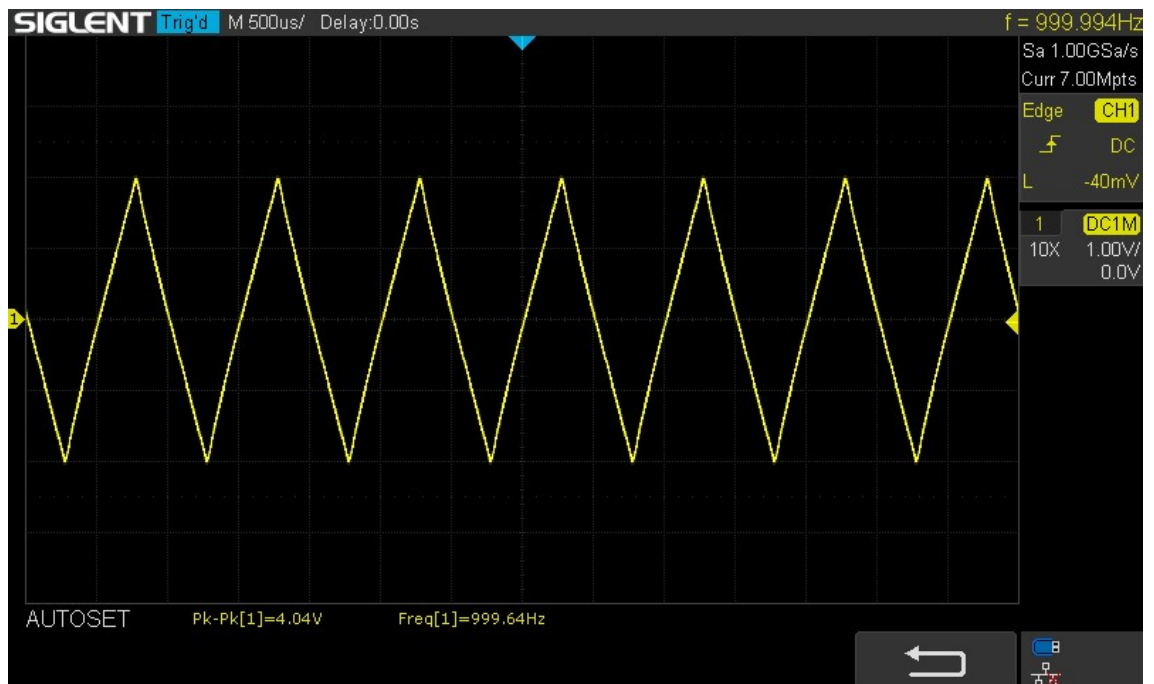
2.4 lentelė. Trikampės bangos kokybės analizės preliminarūs duomenys iš leistuvo ir kompiuterio

Dažnis, (kHz)	Bangos iškraipymai iš leistuvo	Bangos iškraipymai iš sugeneruoto įrašo
0.2	Yra	Nėra
1	Yra	Nėra
3	Yra	Yra
4	Yra	Yra
5	Yra	Yra
6	Yra	Yra
7	Yra	Yra
8	Yra	Yra
9	Yra	Yra
10	Yra	Yra
11	Yra	Yra
12	Yra	Yra

Iš 2.4 lentelės matyti, kad leistuvo viso dažnio bangos yra iškraipytos, bet iš sugeneruoto ir paleisto iš kompiuterio bangos nėra visos iškraipomos, 200 Hz ir 1 kHz bangos, yra tikslios trikampės bangos formos, tačiau didėjant dažniui, trikampė banga, pradeda keistis ir tapti, nepanaši į trikampę bangą.



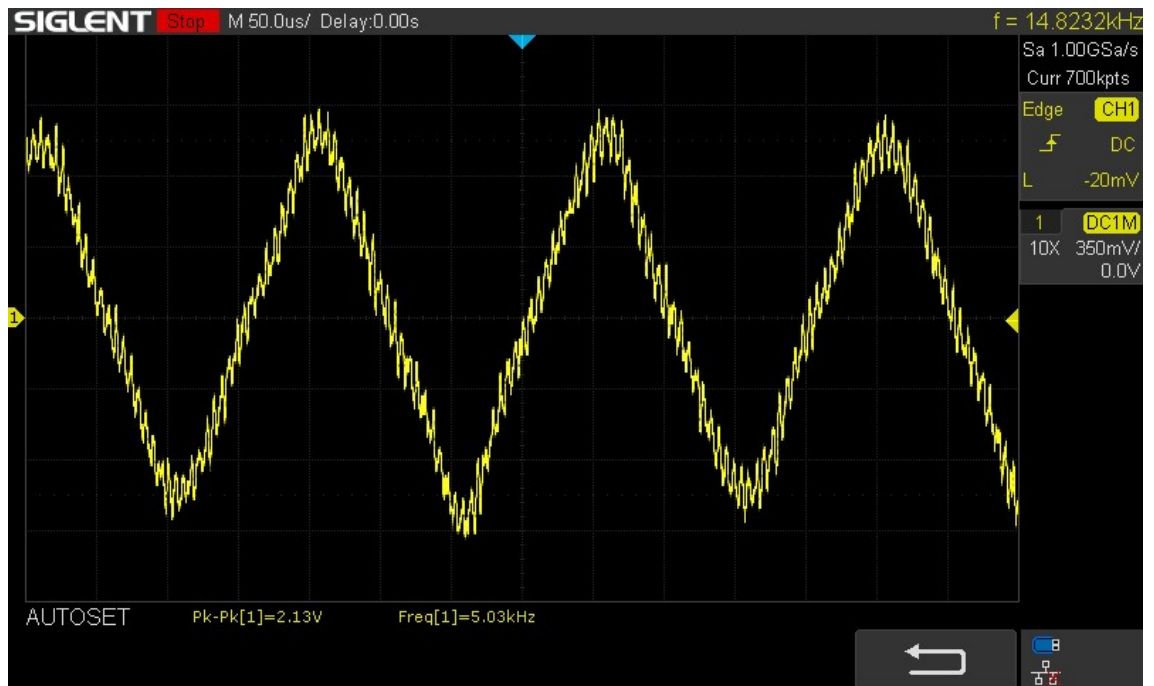
a)



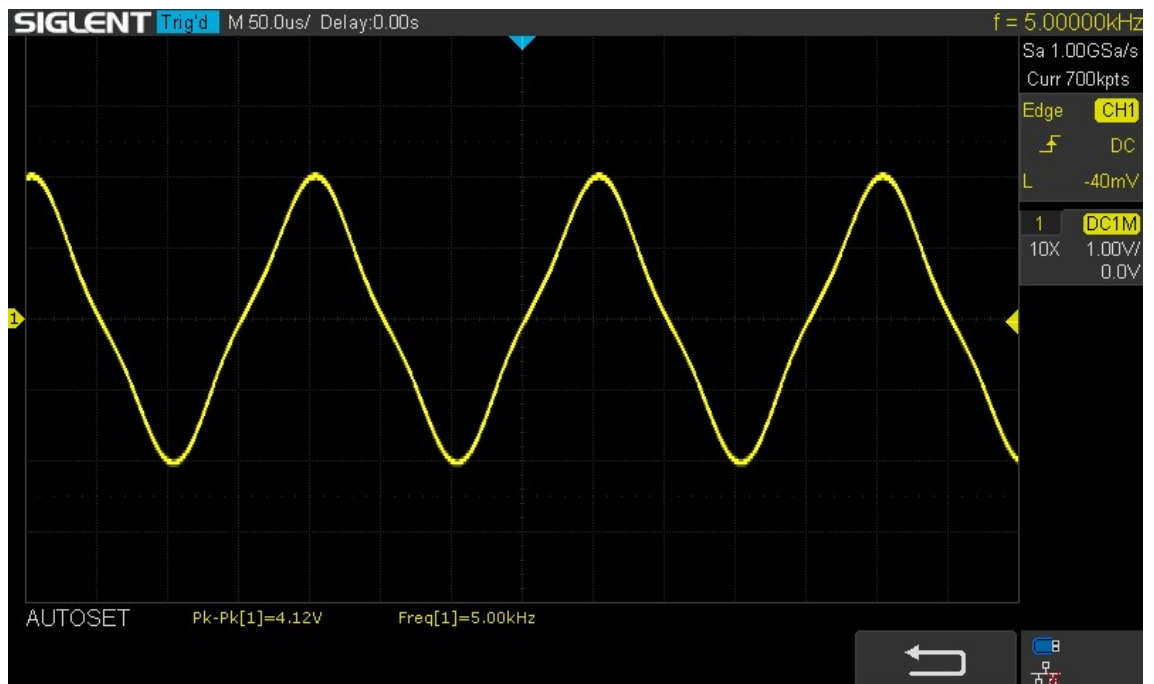
b)

2.24 pav. Trikampė banga 1 kHz: a) iš leistuvo; b) iš kompiuterio

2.24 paveiksle pateikta trikampė 1 kHz banga, matyti, kad formos išsilaiko trikampės bangos, tačiau iš leistuvo simuliuojant bangą, nors ir forma išlieka trikampė, tačiau atsiranda daug triukšmų lyginant su trikampe banga paleista iš kompiuterio. Iš kompiuterio paleista trikampė banga nėra iškraipoma, įtampa yra 4,04 V, kai tuo tarpu leistuve yra 2,16 V.



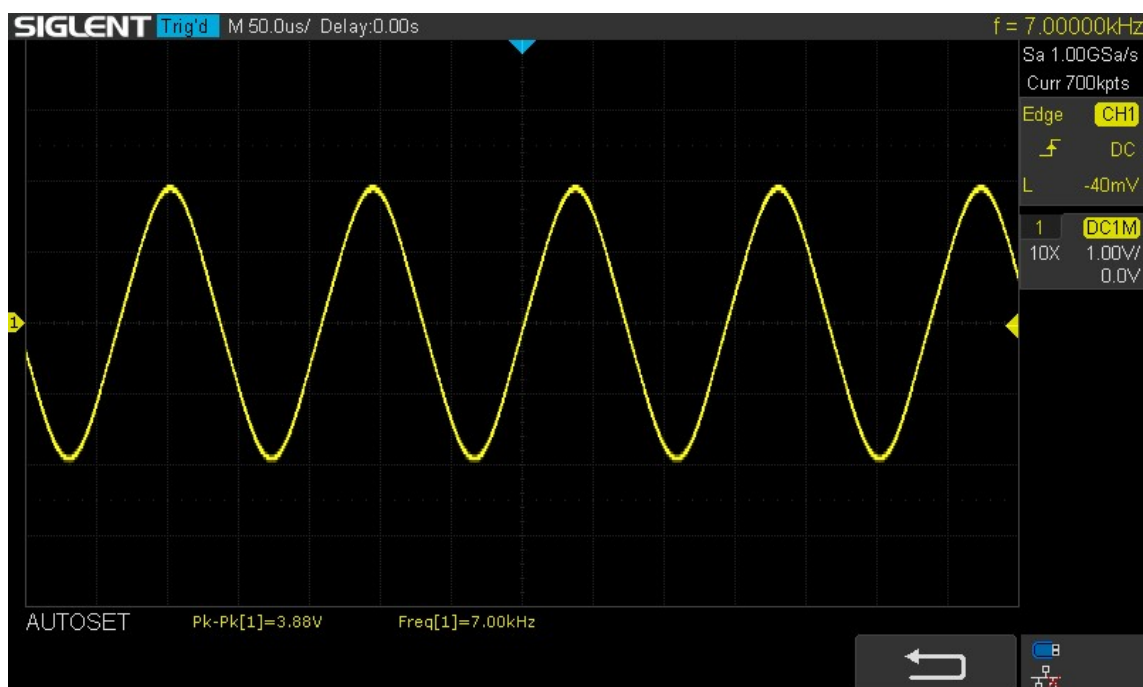
a)



b)

2.25 pav. Trikampė banga 5 kHz: a) iš leistuvo; b) iš kompiuterio

Esant 5 kHz trikampei bangai (2.25 paveikslas) matyti, kad ji nėra visai taisyklinga, viršūnės – apvalios, o tiesėse atsiranda bangavimai, kaip ir visais atvejais, taip ir šiuo matyti, kad leistuve lyginant su iš kompiuterio leista banga yra daugiau triukšmų, tiesė nėra visai vientisa. Įtampų amplitudė leistuve 2,13 V, o iš kompiuterio simuliuojamos trikampės bangos 4,12 V. Tokią bangą, kaip trikampę tirti nėra prasmės, nes ji panašėja į sinusoidę, o kertiniai bangos taškai – aukštinės, labiau panašūs į sinusoidės.



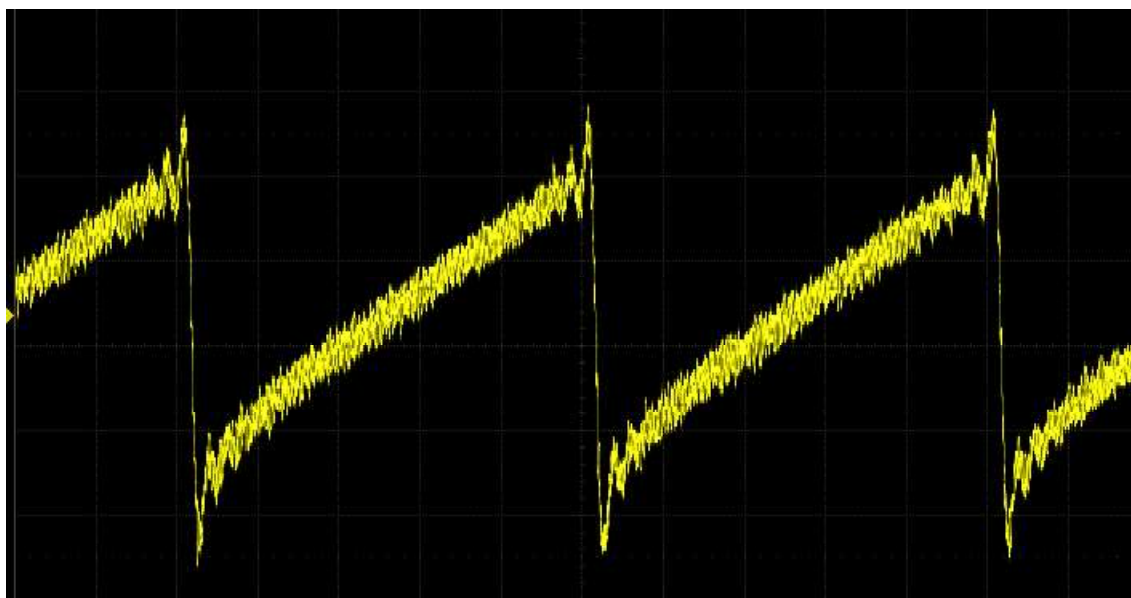
2.26 pav. Sugeneruota trikampė banga iš kompiuterio 7 kHz

Trikampė banga nuo 7 kHz, tampa panaši į sinusoidę (2.26 paveikslas). Galima matyti, kad didinant dažnį pradžioje pradeda apvalėti statinės, kol visai pasidaro ne stačios, o apvalios, toliau didinant dažnį tendencija išlieka ta pati. Įtampa esant 7 kHz trikampei bangai yra 3,55 V. Tokią bangą tirti, galima tik kaip sinusoidę.

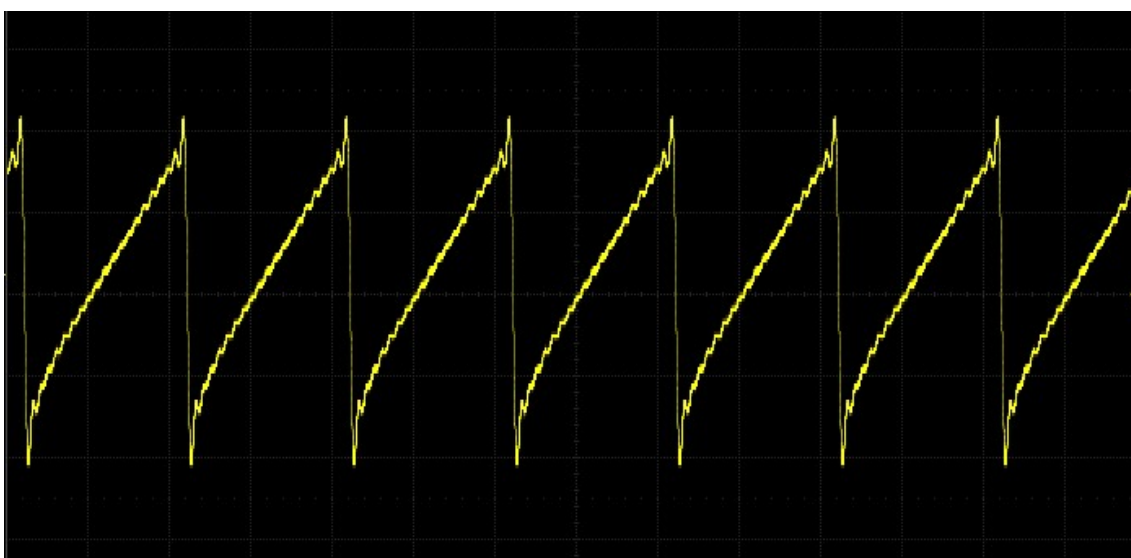
2.5 lentelė. Pjūklinės bangos kokybės analizės preliminarūs duomenys iš leistuvo ir kompiuterio

Dažnis, (kHz)	Bangos iškraipymai iš leistuvo	Bangos iškraipymai iš sugeneruoto įrašo
0.2	Yra	Yra
1	Yra	Yra
3	Yra	Yra
4	Yra	Yra
5	Yra	Yra
6	Yra	Yra
7	Yra	Yra
8	Yra	Yra
9	Yra	Yra
10	Yra	Yra
11	Yra	Yra
12	Yra	Yra

Iš 2.5 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad nuo 200 Hz iki 12 kHz pjūklinė banga yra iškraipyta ir leistuve ir kompiuteryje simuliuotame signale. Kylant dažniui atsiranda didesni iškraipymai.



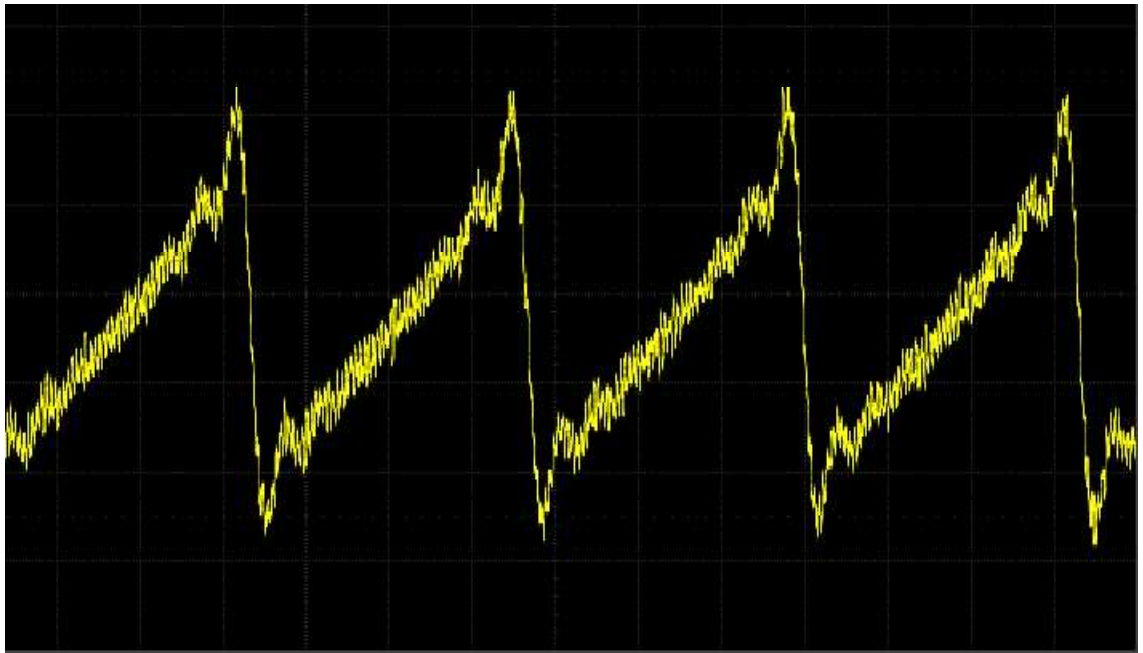
a)



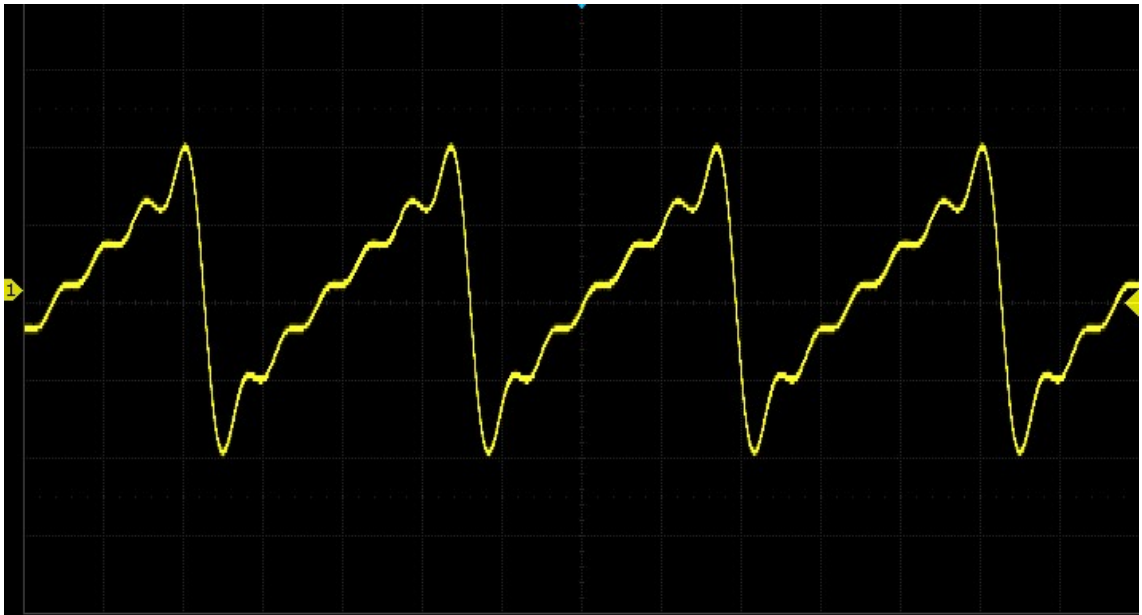
b)

2.27 pav. Pjūklinė banga 1 kHz: a) iš leistuvo b) iš kompiuterio

Matyti iš 2.27 paveiksle pateiktų 1 kHz pjūklinių bangų, kad forma panaši į pjūklo, tačiau turi daug triukšmų. Įstriža linija nėra visai tiesi, o yra išsigaubusi, ties vertėmis, kai kyla ir leidžiasi yra susvyravimas, abejais atvejais matyti, signalo taškai, tai reiškia, kad turėtų banga būti sudaryta iš daugiau taškų. Leistuve simuliuotos bangos įtampa 2,72 V, o kompiuteryje 4,28 V. Matyti, kad kompiuteryje simuliuotoje bangoje yra mažiau triukšmų.



a)



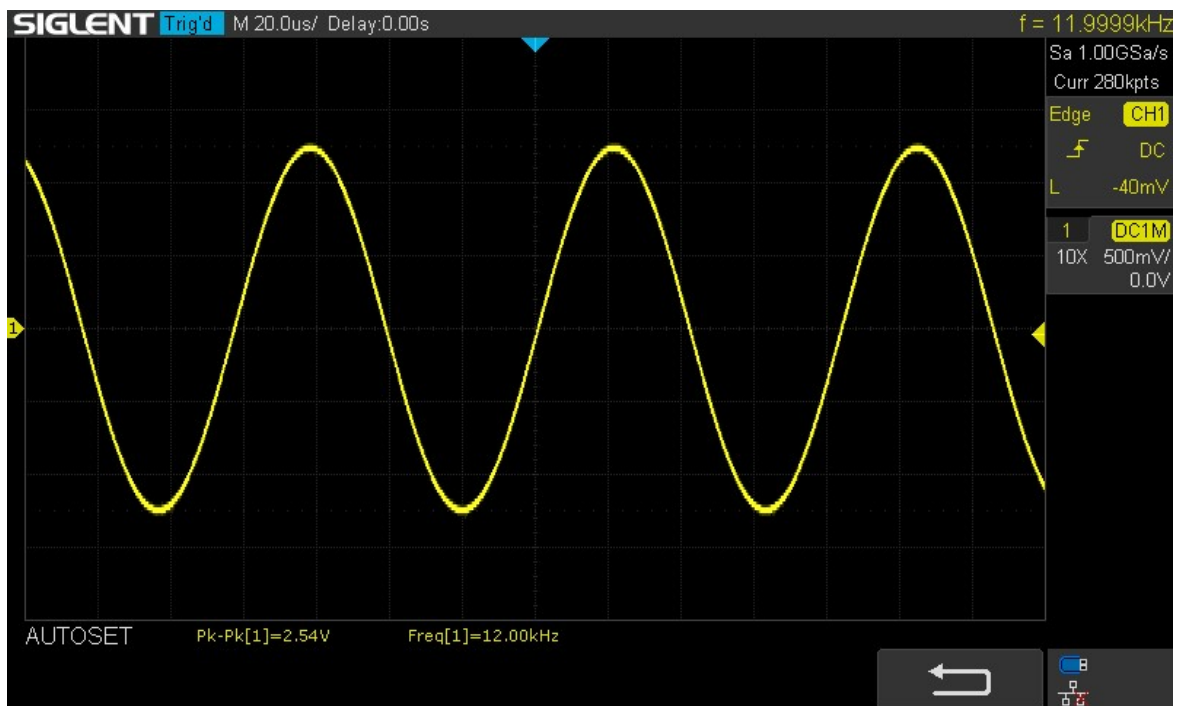
b)

2.28 pav. Pjūklinė banga 3 kHz: a) iš leistuvo; b) iš kompiuterio

Didinant pjūklinės bangos dažnį, atsiranda dar didesni bangos iškraipymai, vertikali bangos dalis tampa, pavirtusi, o įstrižainė, išlinksta (2.28 paveikslas). Matyti, kad tiek leistuve, tiek ir kompiuteryje simuliuojamos bangos įstrižainės bangos dalies banga yra laiptuota, o viršūnėse yra iškrypimai. 3 kHz bangos įtampos amplitudės yra: leistuve 2,60 V, o kompiuteryje simuliuotos 4,00 V.



a)



b)

2.29 pav. Sugeneruota pjūklinė banga iš kompiuterio: a) 9 kHz; b) 12 kHz

Dar labiau didinant dažnį, matyti, dar didesni iškraipymai, o galiausiai pjūklinė banga, tampa sinusoidės formos, tokią bangą tirti, kaip pjūklinę nėra prasmės. Iš kompiuterio simuliuotos pjūklinės sugeneruotos bangos (2.29 paveikslas) įtampos esant 9 kHz yra 3,26 V, o 12 kHz – 2,54 V, matosi, kad įtampos amplitudė, taip pat yra mažesnė, lyginant su žemesnio dažnio pjūklinėmis bangomis leistomis iš kompiuterio, pvz. 1 kHz pjūklinės bangos įtampa buvo 4,26 V.

Apibendrinant valdymo signalo bangos tyrimą, galima teigti, kad visos bangos simuliuojamos iš leistuvo yra iškraipomos. Stabiliausia banga yra sinusinės bangos, kadangi keliant dažnį, banga išlieka nepakitusių formų. Visos bangos didinant dažnį įgauna sinusoidės formą, todėl tirti kaip ne sinusoidę, nėra prasmės todėl, kad signalas praranda savo formą. Didinant dažnį, įtampos amplitudė didėja. Sugeneruota banga nėra visai taisyklingos, išskyrus sinusinės bangos formą, o leidžiant bangas iš leistuvo atsiranda dar daugiau harmonijų.

2.3.3.2. Eksperimentinė valdymo signalo su garso stiprintuvu analizė simuliuojant iš kompiuterio

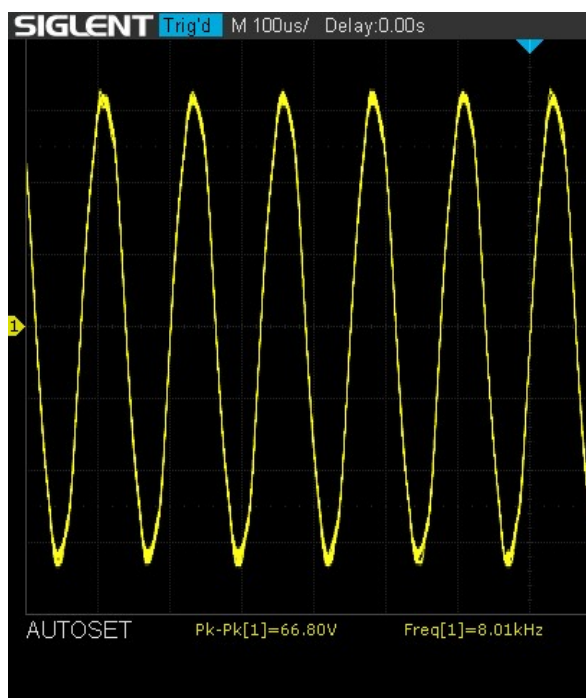
Iš atlikto eksperimentinio valdymo signalo be garso stiprintuvo analizės, yra eliminuojami valdymo signalai, su dideliais iškraipymais. Taip pat neaprašomos tos bangos, kurios nesukuria sukimo momento, todėl pateikiamos tik bangos sukuriančios sukimo momentą ir yra labiausiai panašios į sugeneruotas – nėra iškraipytos. Tyrimo metu iš kompiuterio simuliuojamas valdymo signalas, paduodamas į stiprintuvą, o stiprintuvo išvestyje atliekami matavimai, yra užjungiamas pjezoelektrinis diskas, kuris atremtas į guolį ir sukuria sukimo momentą.

Sinusinės bangos valdymo signalas

2.6 lentelė. Sinusinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties ir įvesties duomenys

Dažnis (kHz)	Įvesties srovė, A	Įtampa, stiprintuvo išvestyje, V	Sukimosi greitis, °/s
8	0,14	66	6,759
11	0,21	78	1,978
12	0,24	84	16,901
13	0,27	83	31,755

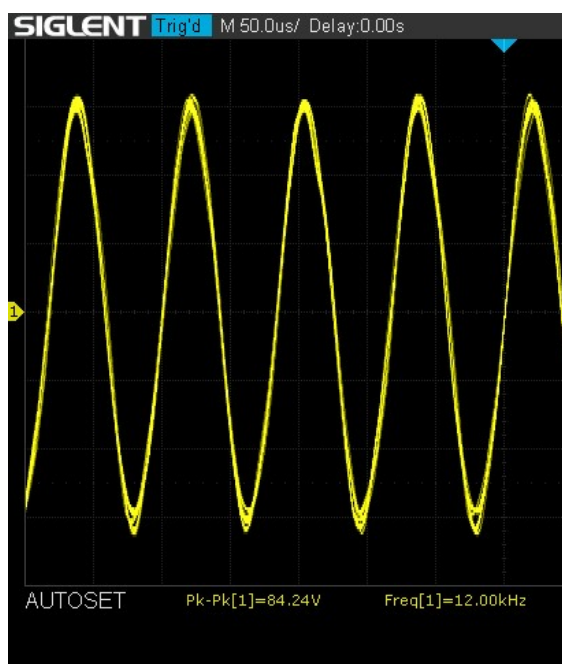
Precizinė pavara su sinusiniu valdymo signalu (2.30 paveikslas) generuojamu iš kompiuterio, sukuria sukimo momentą su 8, 11, 12, 13 kHz dažniais. 2.6 lentelėje pateikti garso stiprintuvo įvesties srovė, išvesties įtampa ir pjezoelektrinės pavaros sukimosi greitis. Greičiausiai sukasi su 13 kHz dažniu – 31,755°/s greičiu. Pačios sinusinės valdymo signalo bangos turi iškraipymų, matyti aukštinėse papildomų vektorių – vietomis signalas yra išstorintas, tačiau esminio pokyčio valdymo atžvilgiu sistemai nesudaro. Didžiausia garso stiprintuvo įvesties srovė, ir išvesties įtampa yra su 13 kHz dažniu, srovė siekia 0,24 A, įtampa 83 V. Mažiausia stiprintuvo įvesties srovė 0,14 A ir įtampa 66 V yra 8 kHz dažnio valdymo signalo, tačiau sukasi ne lėčiausiai – 6,759°/s greičiu, kai tuo tarpu 11 kHz dažnio sinusinė valdymo banga sukasi 1,978°/s greičiu. Visais bandymais stiprintuvo įvesties įtampa buvo 24 V.



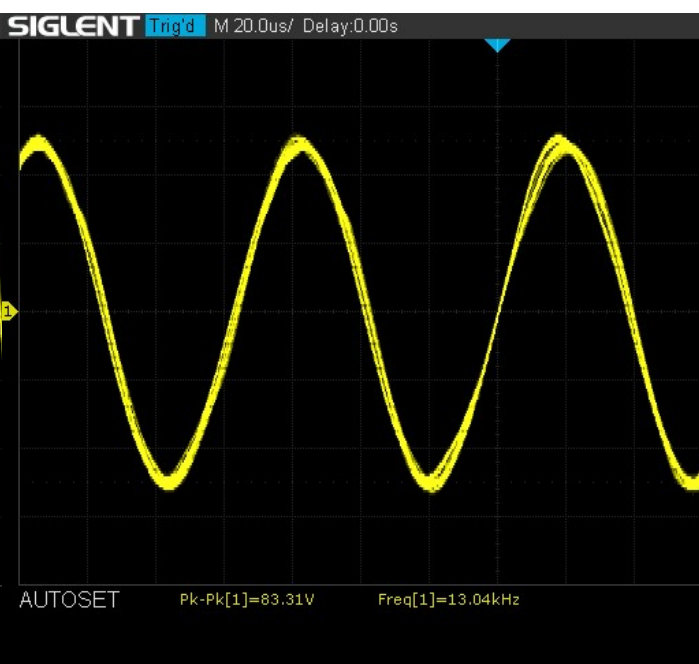
a)



b)



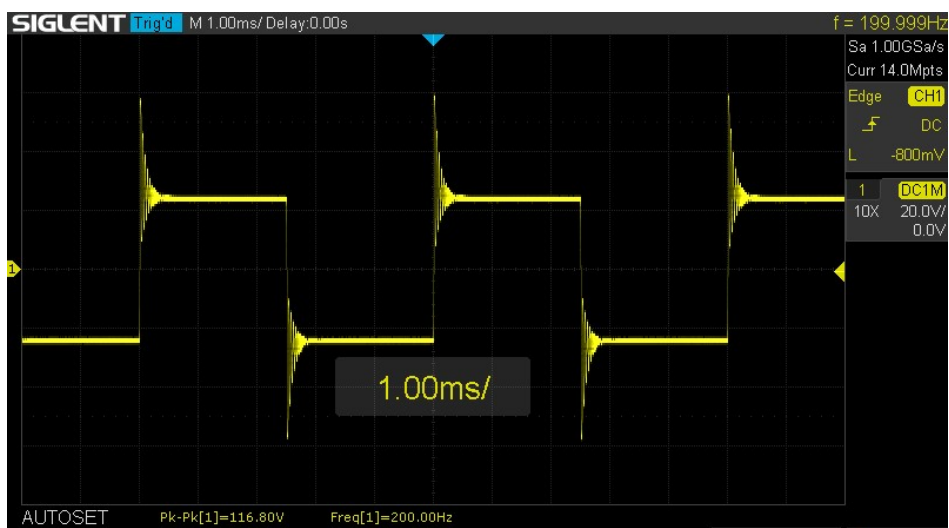
c)



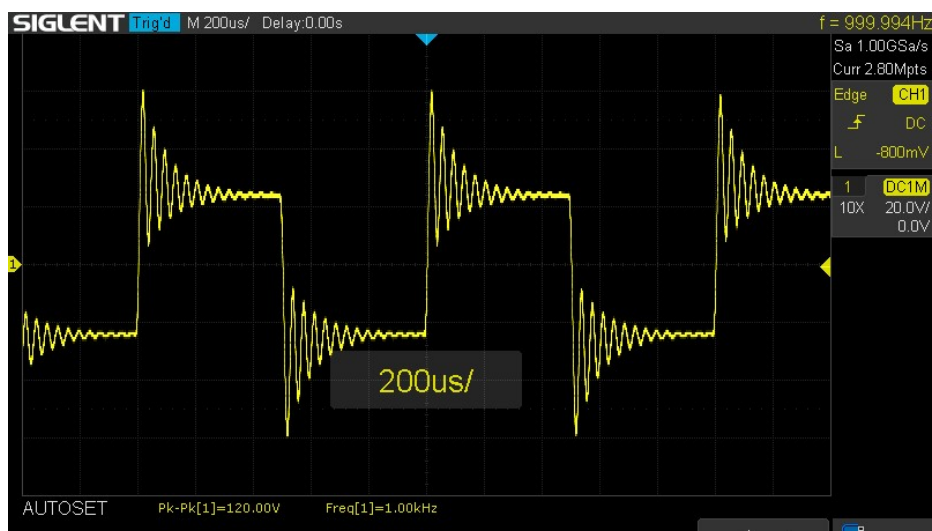
d)

2.30 pav. Sinusinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos: a) 8 kHz; b) 11 kHz; c) 12 kHz; d) 13 kHz

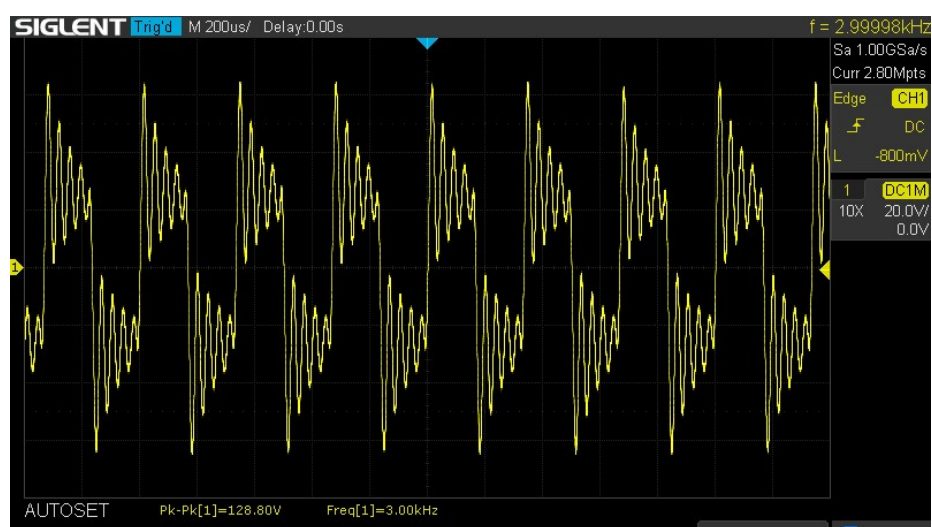
Staičiakampės bangos valdymo signalas



a)



b)



c)

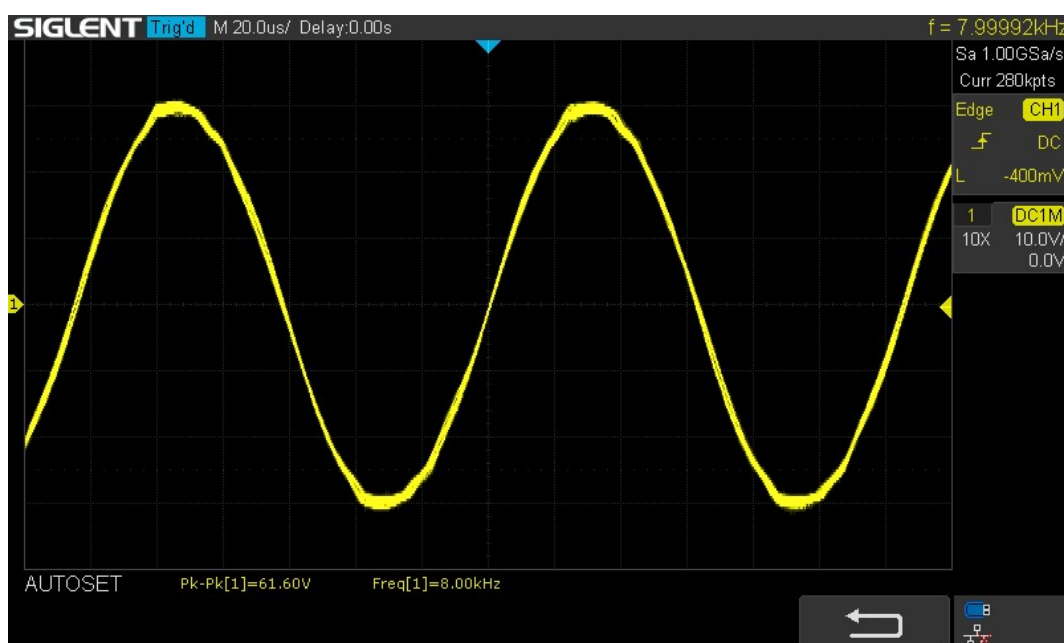
2.31 pav. Staičiakampės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos: a) 0,2 kHz; b) 1 kHz; c) 3 kHz

2.7 lentelė. Stačiakampės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties ir įvesties duomenys

Dažnis (kHz)	Įvesties srovė, A	Įtampa, stiprintuvo išvestyje, V	Sukimosi greitis, °/s
0,2	0,05	117	0,519
1	0,09	120	0,896
3	0,24	128	0,8

2.7 lentelėje pateikta stačiakampės bangos valdymo signalo (2.31 paveikslas) su garso stiprintuvu išvesties ir įvesties duomenys. Bandymai atlikti esant garso stiprintuvo 24 V maitinimo įvesties įtampai. Eksperimento metu pastebėta, kad simuliuojamo kompiuteriu stačiakampės bangos signalo, sukimo momentas buvo sukuriamas ir su 10 Hz dažniu, tačiau dėl duomenų palyginimo toks signalas nėra tyrinėjamas. Tiriamos bangos šiuo atveju yra 200 Hz, 1 kHz, 3 kHz. Matyti, kad kai dažnis būna 3 kHz, stačiakampė banga, turi ilgą nusistovėjimo periodą dažnio atžvilgiu ir aukštas, bei žemas ašies atžvilgiu signalas netampa horizontalus, todėl toliau nuspręsta netirti aukštesnio dažnio signalų. Kadangi jie yra dar labiau iškraipomi ir tirti kaip stačiakampės bangos nėra prasmės, nes atsiranda aukšti įtampos amplitudės svyravimai, signalas tampa neharmoninių bangų. Didžiausią sukimo momentą sukuria, kai valdymo signalo dažnis būna 1 kHz, esant šiam dažniui sukuriamas sukimo momentas, kuris guolį suka 0,896°/s greičiu, garso stiprintuvo įvesties srovė būna 0,09 A, o išvesties įtampa 120 V. Mažiausias sukimo momentas būna, kai veikia 200 Hz dažnis, šiuo dažniu guolis sukasi 0,519°/s greičiu, garso stiprintuvo įvesties srovė būna 0,05 A, o išvesties įtampa 117 V, galima pastebėti, kad visi šie parametrai lyginant su 1 kHz skiriasi ne žymiai.

Trikampės bangos valdymo signalas

**2.32 pav.** Stačiakampės bangos valdymo 8 kHz signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos

2.8 lentelė. Trikampės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties ir įvesties duomenys

Dažnis (kHz)	Įvesties srovė, A	Įtampa, stiprintuvo išvesties, V	Sukimosi greitis, °/s
8	0,14	65	7,022

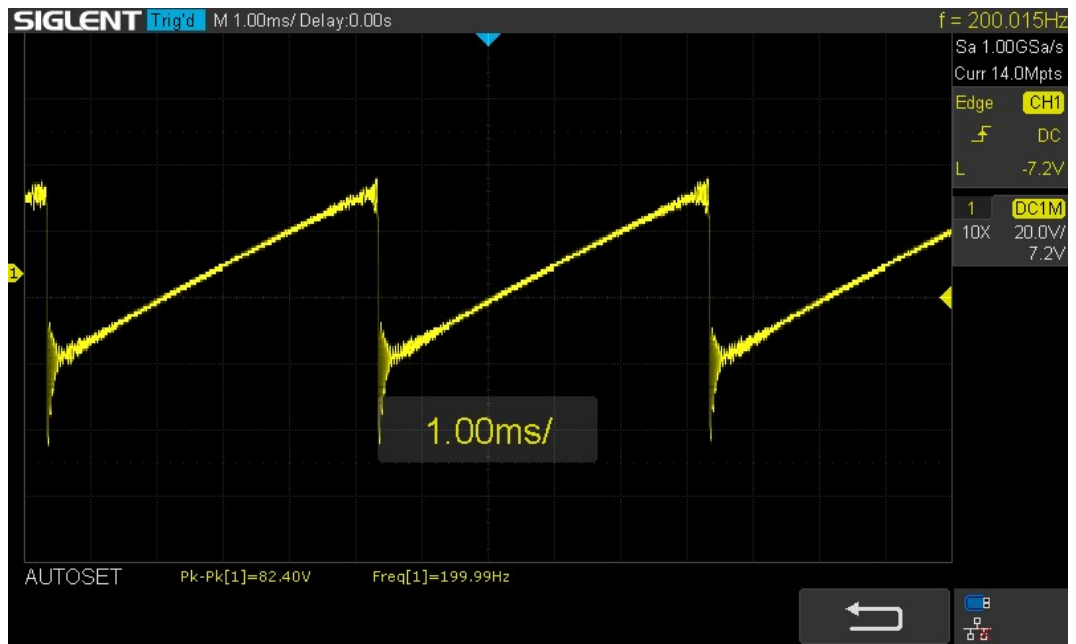
Trikampės bangos valdymo signalas, kai sukuriama judesio momentas yra 8 kHz dažnio. Šis siunčiamas valdymo elektrinis trikampės bangos signalas yra iškraipytas ir tampa panašus į sinusinės bangos formą (2.32 paveikslas). Veikiant mažesniems dažniams, kai banga trikampė, banga nėra iškraipoma, nesukuriama sukimo momentas. Didinant dažnį, signalas yra iškraipomas, todėl nėra tikslo tokį signalą tirti kaip trikampės bangos. Kai buvo sukurtas sukimo momentas matyti iš 2.8 lentelės, kad įvesties srovė garso stiprintuve buvo 0,14 A, išvesties įtampa 65 V, šis signalas sukūrė sukimo momentą, kuris pavara suko 7,022°/s greičiu.

Pjūklinės bangos valdymo signalas

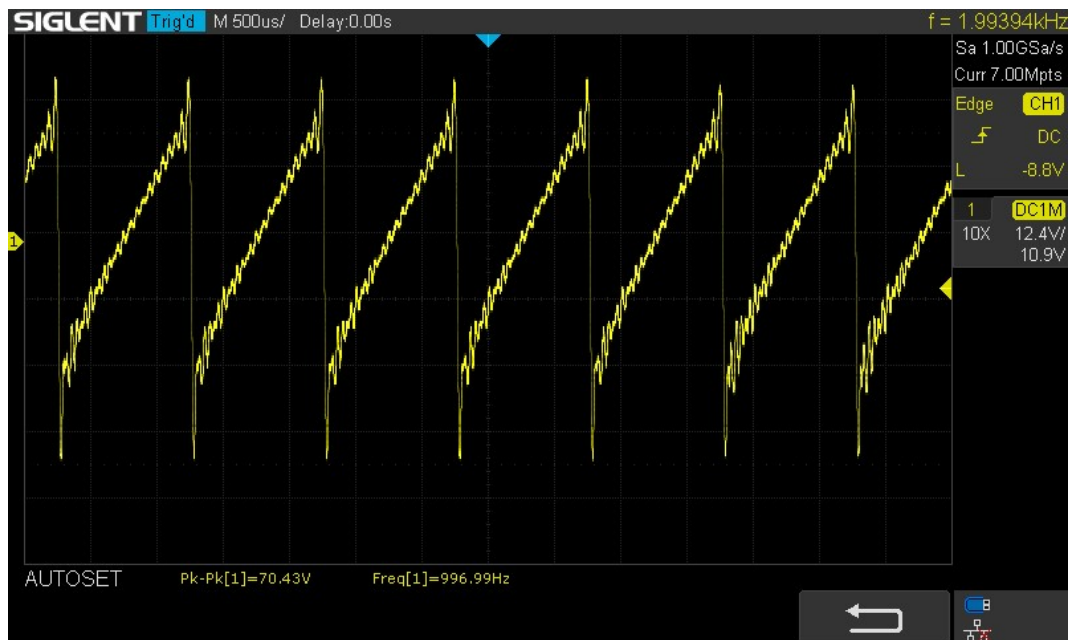
2.9 lentelė. Pjūklinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties ir įvesties duomenys

Dažnis (kHz)	Įvesties srovė, A	Įtampa, stiprintuvo išvestyje, V	Sukimosi greitis, °/s
0,2	0,14	66	6,759
1	0,21	78	1,978
3	0,24	84	16,901
4	0,27	83	31,755

Iš 2.9 lentelėje pateiktų elektrinių valdymų signalų stiprintuvo išvestyje matyti, kad pavara sukuria sukimo momentą su 0,2, 1, 3 ir 4 kHz dažniais. Garso stiprintuvo įvesties įtampa 24 V. Eksperimento metu pastebėta, kad pjūklinė valdymo signalo banga, sukimo momentą, sukuria mažiausiai su 5 Hz dažniu. Sukimosi greitis pastoviai didėja, kai yra didinamas dažnis, išskyrus, kai būna 3 kHz dažnis. Didžiausias greitis, išvesties įtampa ir įvesties srovė būna, kai yra paduodamas 4 kHz signalas: įtampa 88 V, srovė 0,17 A, sukimosi greitis 2,041°/s. Lėčiausiai sukasi ir būna mažiausia įvesties srovė, kai valdoma 200 Hz dažniu, sukimosi greitis būna 0,062°/s, o įvesties srovė 0,09 A. Visos pjūklinės bangos yra iškraipytos (2.33 ir 2.34 paveikslai), o didinant dažnį dar labiau tai matyti, vertikali signalo dalis tampa ne statmena Y ašies atžvilgiu, signalo maksimaliose ir minimaliose dalyse matyti pereinamieji vyksmai, o įstrižainėse matyti nemažai pašalinių harmonijų, todėl tirti su aukštesniu dažniu, kaip pjūklinio valdymo signalo, nėra prasmės.

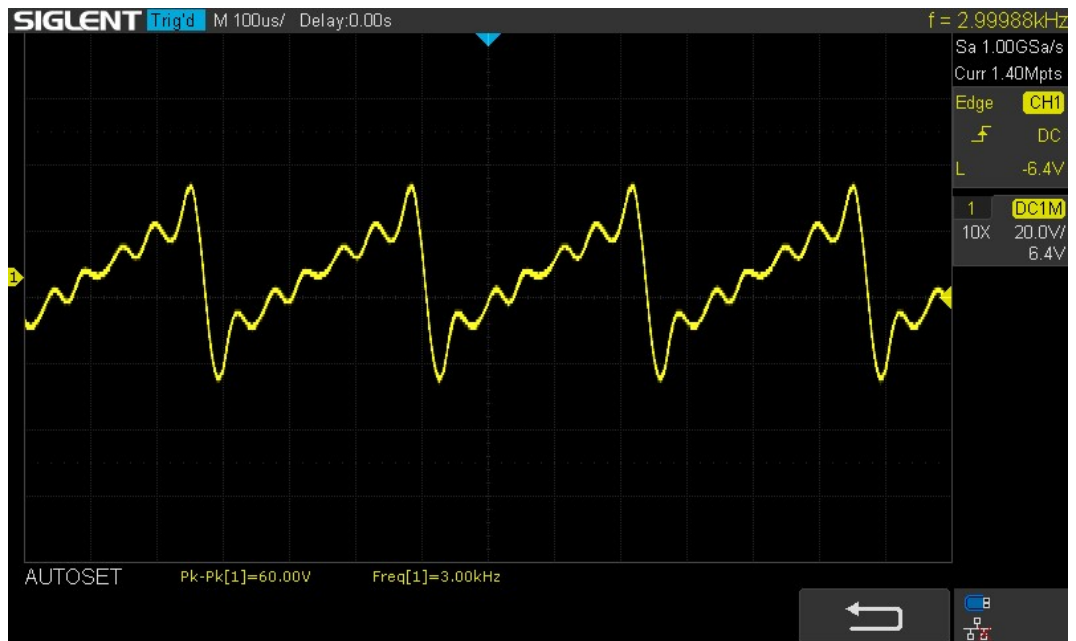


a)

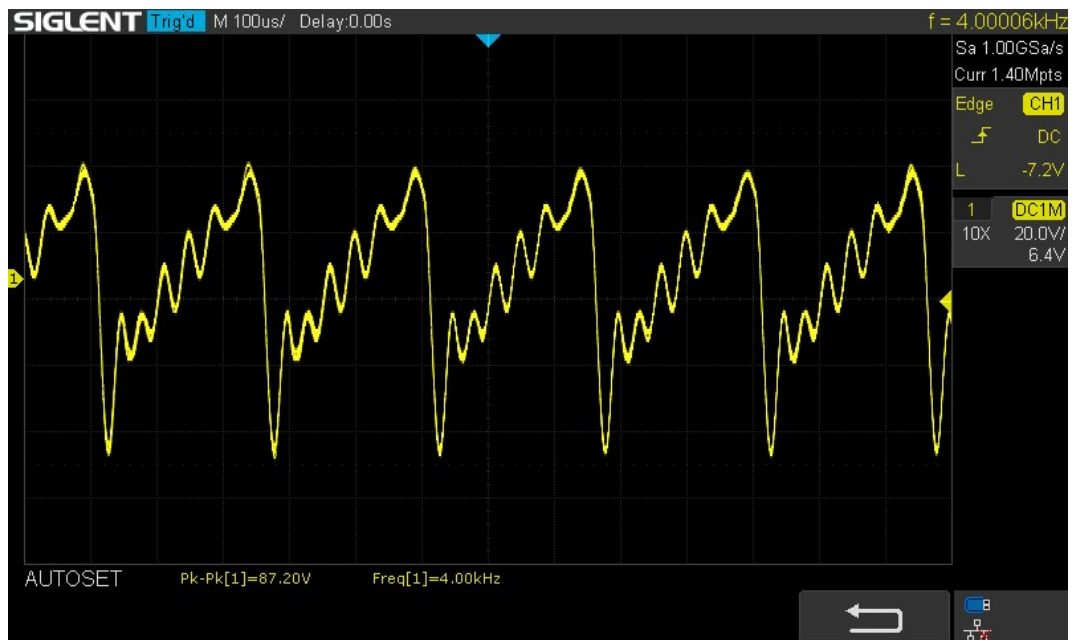


b)

2.33 pav. Pjūklinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos: a) 0,2 kHz;
b) 1 kHz



a)

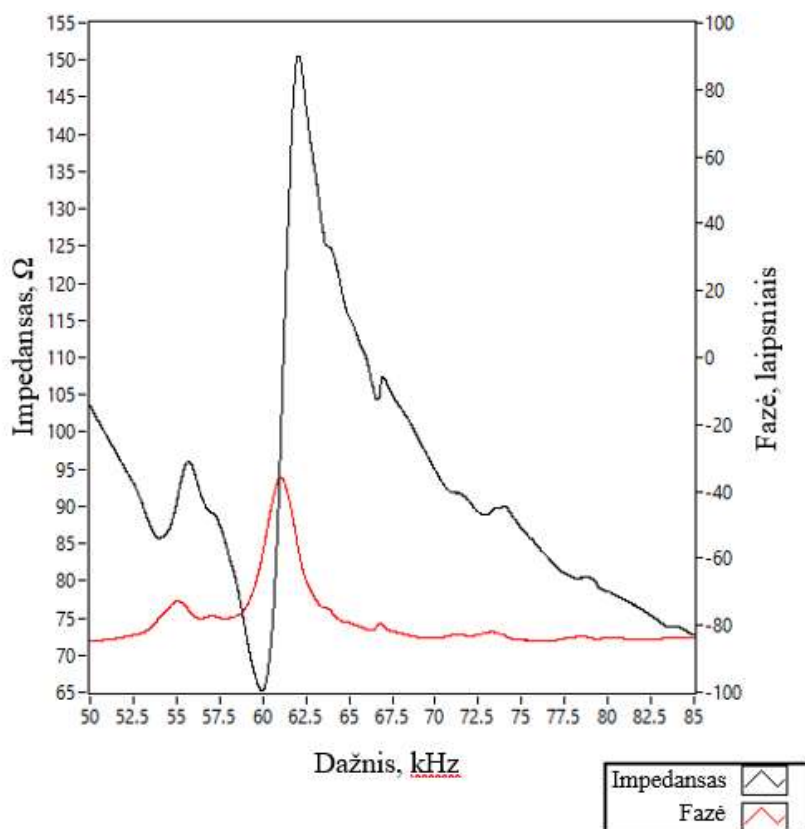


b)

2.34 pav. Pjūklinės bangos valdymo signalo su garso stiprintuvo išvesties diagramos: a) 3 kHz; b) 4 kHz

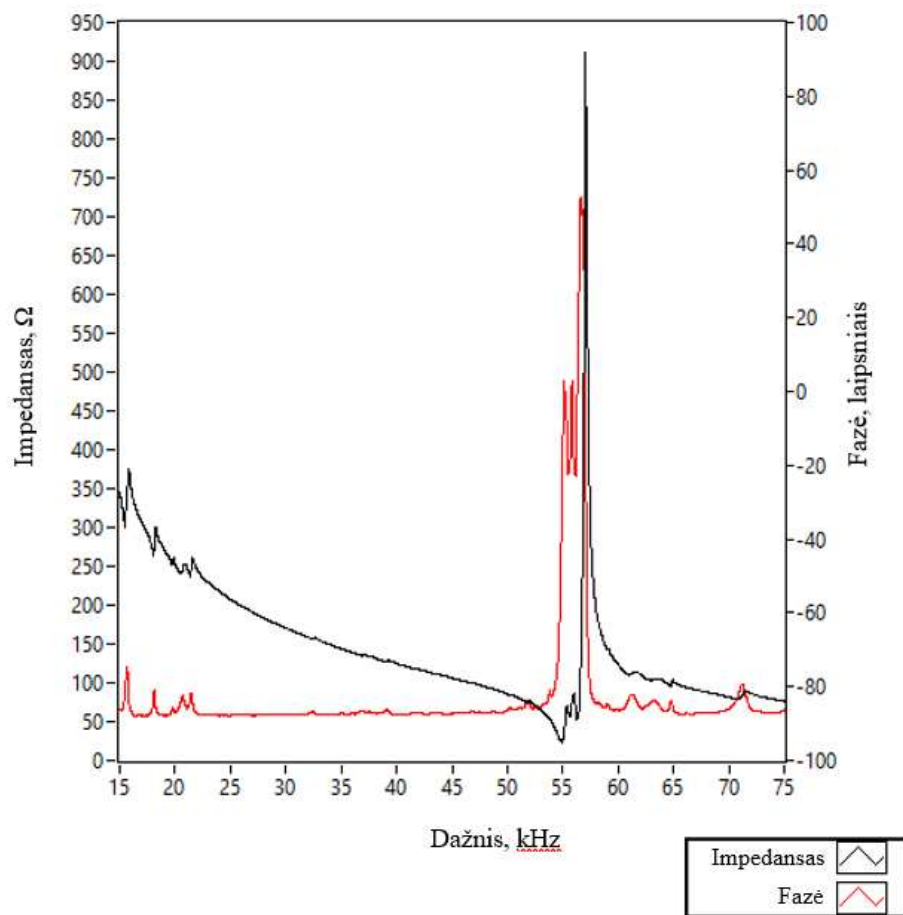
2.3.4. Pjzokeramikinio disko impedans-dažninė ir fazinė charakteristika ir elektrinė talpa

Pjezoelektrinės pavaros veikimo efektyvumo priklausomybė nuo žadinimo dažnio turi du esminius taškus: rezonansinį dažnį – dažnį, kuriame pjezoelektrinis elementas veikia aukščiausiu koeficientu ir geriausiai elektrinę energiją paverčia virpėjimu, bei antirezonansinį dažnį – dažnį, kuriame elementas yra mažiausiai paveikiamas mechaninių vibracijų.



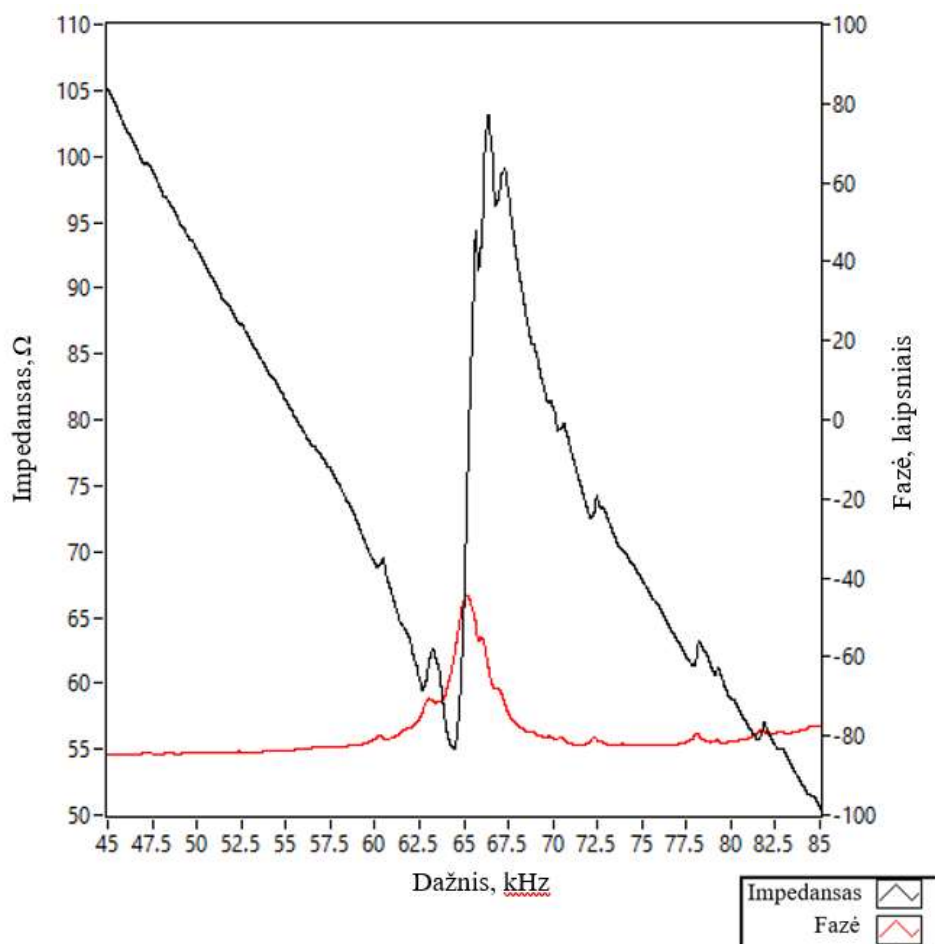
2.35 pav. 50 mm įtvirtinto pjzokeramikinio disko impedans-dažninė ir fazinė charakteristika

Pjezoelektrinės pavaros rezonansinių dažnių paieškai eksperimentiniu būdu, taikomos dvi metodikos – impedans-dažninė ir fazinė priklausomybės. Šiais metodais gaunami pjzokeramikinio disko priklausomybės nuo dažnio, fazės skirtumo ir impedanso rezultatai. Iš 2.34 paveiksle pateiktos 50 mm įtvirtinto disko impedans-dažninės fazinės charakteristikos matyti, jog kai veikia ~60 kHz dažnio elektrinis valdymo signalas, impedanso varža siekia ~65 omai – šiuo atveju yra didžiausias pjzokeramikos virpėjimas, mažiausias pasipriešinimas elektriniam signalui. Priešingai rezonansui būna antirezonansinis reiškinys, kuris pasireiškia esant ~62,5 kHz dažniui, o tuo metu būna 150 impedanso varža, tai reiškia, kad veikia didžiausia srovė, bet pjezoelektriniai virpėjimai nėra sukuriami. Taip pat, kai yra didžiausi srovės ir įtamos fazių skirtumai, tuo metu būna antirezonansinis reiškinys ~90 laipsnių.



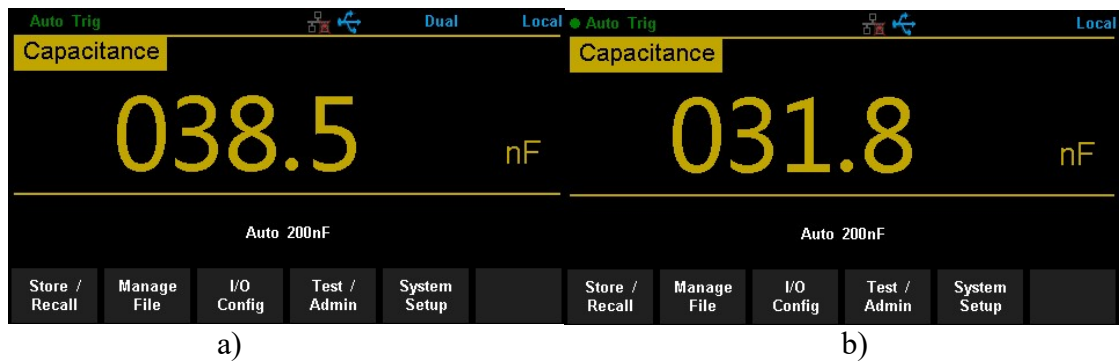
2.36 pav. 50 mm neįtvirtinto pjezokeramikinio disko impedans-dažninė ir fazinė charakteristika

Nagrinėjant 2.35 paveiksle pateiktos 50 mm neįtvirtinto pjezokeramikinio disko impedans-dažninę charakteristiką matyti, kad rezonansinis dažnis pasiekiamas prie mažesnio dažnio ~55 kHz. Tuo metu impedanso varža būna ~25 omai, antirezonansinis reiškinys pasireiškia, kai būna ~67 kHz, o fazės srovės skirtumas antirezonanso režime būna apie 55 laipsniai. Lyginant su įtvirtintu pjezokeramikinio disko impedans-dažnine charakteristika (2.34 paveikslas), matyti, kad rezonansinis dažnis neįtvirtinto disko yra 5 kHz mažesnis, o varža būna 75 omais mažesnė, kas reiškia, kad yra reikalingas mažesnis elektros kiekis virpesiams sukelti. Tačiau dėl pavaros konstrukcijos, tokių parametrų išgauti nėra, nes pjezokeraminį diską, reikia įtvirtinti vertikaliai ir turi gerai laikytis.



2.37 pav. 35 mm įtvirtinto pjezokeramikinio disko impedans-dažninė ir fazinė charakteristika

Lyginant 50 mm (2.34 paveikslas) ir 35 mm įtvirtinto pjezokeramikinio disko impedans-dažninę ir fazinę charakteristikas matyti (2.36 paveiklas), kad 35 mm disko rezonansinis dažnis yra ~64 kHz, kai tuo tarpu 50 mm pjezokeramikinio disko yra 60 kHz, impedanso varža 10 omų didesnė 50 mm pjezokeramikiniam diske, 35 mm charakteristikoje ji siekia 55 omus. Antirezonansinis dažnis, taip pat yra toliau 67,5 kHz, o tuo metu impedansas būna 105 omai. Galima daryti prielaidą, kad mažesniajam pjezokeramikiniam diskui reikia didesnio dažnio pasiekti rezonansinį, žinant, kad kylant dažniui didėja amplitudės įtampa ir įvesties srovė, galima daryti prielaidą, kad mažesniajam įtvirtintam diskui išjudinti, reikia daugiau elektros energiją, kadangi diskas yra labiau suspaudžiamas, mažesnis virpėjimo plotas.



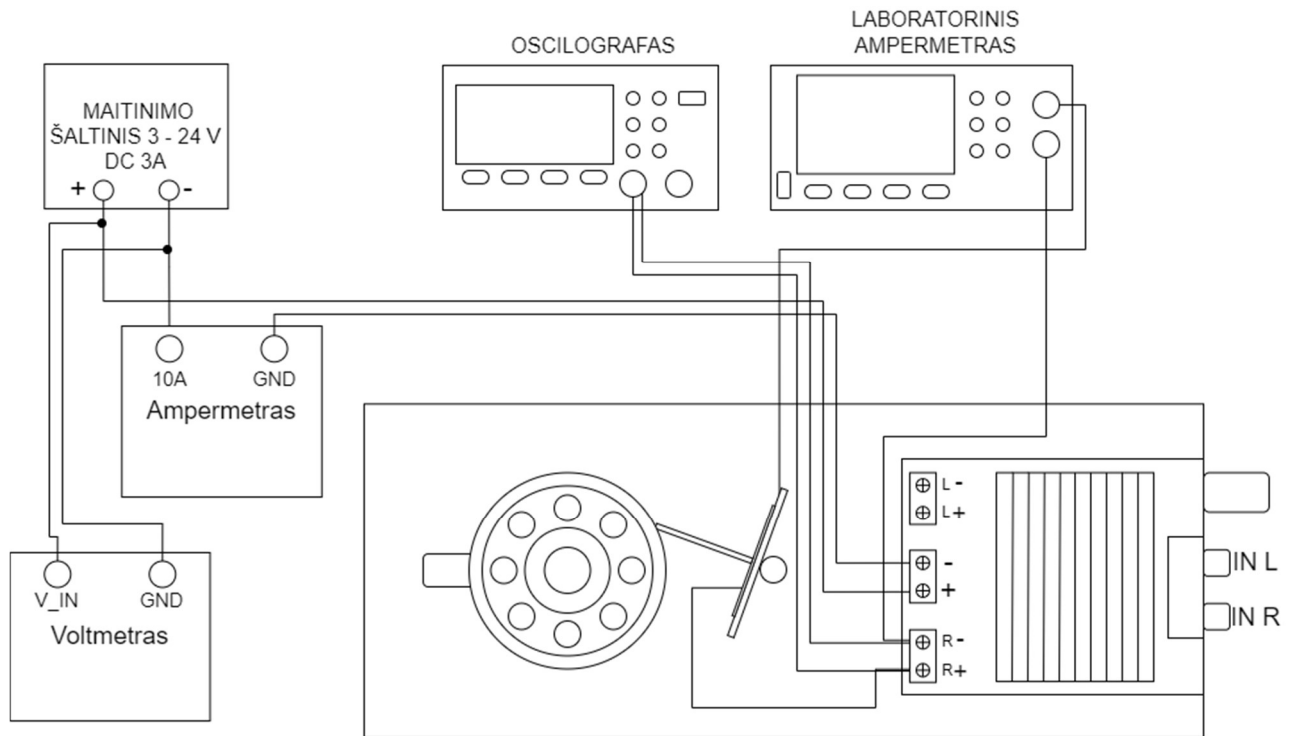
2.38 pav. Pjezokeramikinio disko elektrinė talpa: a) neįtvirtinto disko; b) įtvirtinto disko

Išmatavus pjezokeramikinį diską, kai jis yra įtvirtintas ir neįtvirtintas (2.37 paveikslas), matyti, kad įtvirtinto disko elektrinė talpa yra mažesnė 31,8 nF, o neįtvirtinto siekia 38,5 nF. Iš to galima spręsti, kad įtvirtintas diskas iš pradžių sunaudoja mažiau srovės ir pjezokeramikos talpa nėra pastovus dydis ir gali kisti, nuo disko veikiančių mechaninių jėgų.

Atliekant tyrimą pastebėta, kad prispausta pjezokeramika išjudinti reikalingas didesnis dažnis ir yra didesnė impedanso varža, tai reiškia, kad pavara veikia didesnė srovė ir apkrova. Taip atsitinka dėl to, kad pjezokeramikinis diskas yra standžiai įtvirtintas, o jo vibracijos yra standžiai prispaudžiamos. Kad išvengti pjezokeramikos prispaudimo jėgos, pasirinkta didesnis diskas, kurio rezonansinis dažnis yra mažesnis, taip pat padaryta minkšta atrama, kad būtų kuo mažiau ribojami atgaliniai virpėjimai.

3. TIRIAMOJI DALIS

Šiame skyriuje tiriama precizinės pjezoelektrinės pavaros sistema, nagrinėjant sudarytos sistemos visumą. Tiriama įvairios priklausomybės dažnio atžvilgiu, kaip sistema reaguoja į skirtingus dažnius, bangos tipą, analizuojamas funkcionalumas, privalumai ir trūkumai.



3.1 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo maketo laboratorijoje blokinė schema

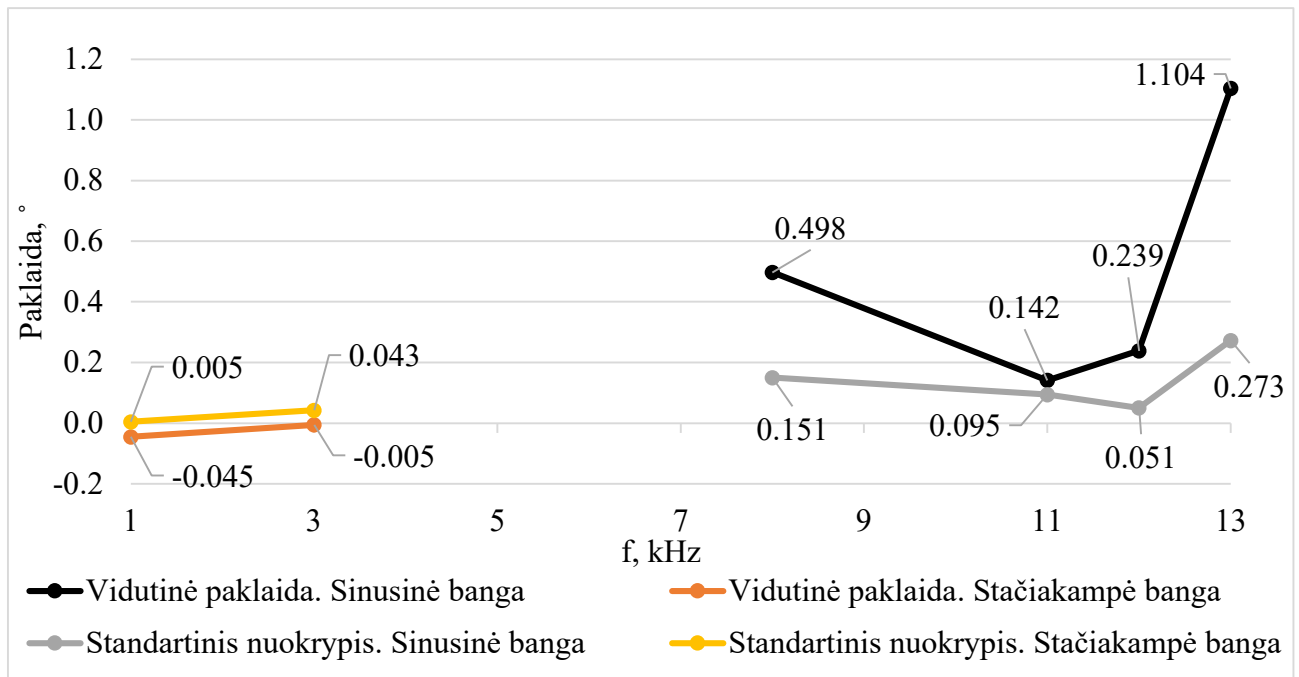


3.2 pav. Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo aplinka

Sudaryta precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo maketo laboratorijoje blokinė schema pateikta 3.1 paveikslas, garso stiprintuvo išvestyje prijungiamas laboratorinis oscilografas ir ampermetras, kad būtų galima ištirti išvesties srovę, įtampą, ir bangos formą veikiant skirtingiems dažniams, bangos tipams. 3.2 paveiksle pateikta tyrimo aplinkos laboratorijoje nuotrauka. Tikslas ištirti kaip veikia skirtingi valdymo signalai, pasisukimo greitį ir tikslumą.

3.1. Pasisukimo paklaidos priklausomybė nuo dažnio ir bangos tipo

Šiame skirsnyje atliekami bandymai ir tiriama pasisukimo paklaidos priklausomybė nuo dažnio ir bangos tipo. Keičiant valdymo signalo dažnį ir jos tipą, atliekami eksperimentai, kurių duomenis matuoja, makete sumontuotas padėties kampo jutiklis, kuris atvaizduoja kiek nuo užduoto kampo pavara nukrypsta. Tyrimas atliekamas esant 24 V garso stiprintuvo įvesties įtampai.

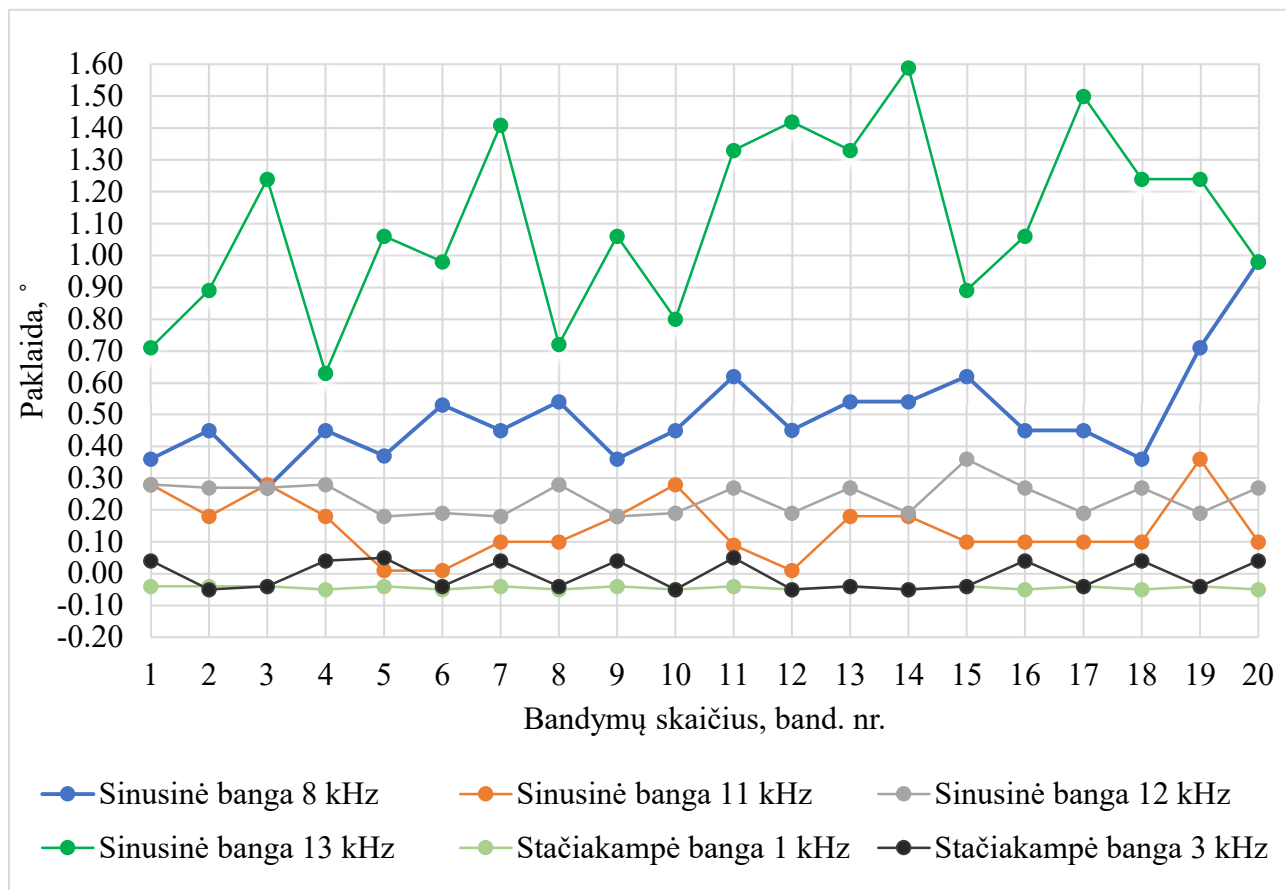


3.3 pav. Sinusinių ir stačiakampių valdymų signalo bangų vidutinės paklaidos ir standartinio nuokrypio priklausomybės nuo dažnio grafikas

Iš eksperimentinių 20-ties bandymų gautų duomenų, gautos vidutinių paklaidos ir standartinių nuokrypių vertės, iš kurių buvo sudarytas 3.3 paveiksle pateiktas sinusinių ir stačiakampių valdymo signalo bangų vidutinės paklaidos ir standartinio nuokrypio priklausomybės nuo dažnio grafikas. Iš grafiko matyti, kad mažiausia vidutinė paklaida yra, kai pavara valdoma stačiakampės 3 kHz dažnio valdymo signalo bangos, paklaida siekia -0,005. Neigiama paklaida susidarė dėl to, kad pavaros programinis kodas parašytas, stabdyti pavara, kai paklaida už nustatytą vertę yra $<$ arba $>$ 0,1 laipsnio vertei (kadangi padėties jutiklis $0,087^\circ$ per padalį tikslumo). Didžiausia vidutinė paklaida atsiranda esant 13 kHz sinusinei valdymo bangai, tokiu valdymo būdu gaunama 1,104 vidutinė paklaida. Iš 3.3 paveiksle pateiktų duomenų, matyti, kad pavara tiksliausiai sustoja į užduotą padėtį esant, 3 kHz stačiakampiai valdymo bangai, vidutinis tikslumas siekia $0,043^\circ$.

Iš standartinio nuokrypio priklausomybės nuo dažnio kreivių pateiktų 3.3 paveiksle matyti, kad mažiausia nuokrypa nuo vidutinės vertės yra $0,005^\circ$, kai valdymo signalo banga būna 1 kHz stačiakampė. Didžiausias nuokrypis būna esant 13 kHz ir siekia $0,273^\circ$. Šių verčių vidurinė vertė yra sinusinis 8 kHz dažnio signalas, kurio standartinis nuokrypis $0,151^\circ$. Lyginant vidutinių paklaidų ir

standartinių nuokrypių kreivių formas pateiktas grafike, matyti, kad grafikų formos panašios, iš ko galima spręsti, kad kintant didėjant paklaidai, didėja ir standartinis nuokrypis, pavara yra labiau nenuspėjama. Pasinaudojus grafike pateiktus standartinių nuokrypio duomenis, pavara galima optimizuoti, pritaikius standartinę nuokrypą programos kode, kadangi žinoma standartinė nuokrypa, kode galima aprašyti, kad nuo užduoto laipsnio valdiklis atimtų standartinę paklaidą, taip pavara taptų dar tikslesnė.

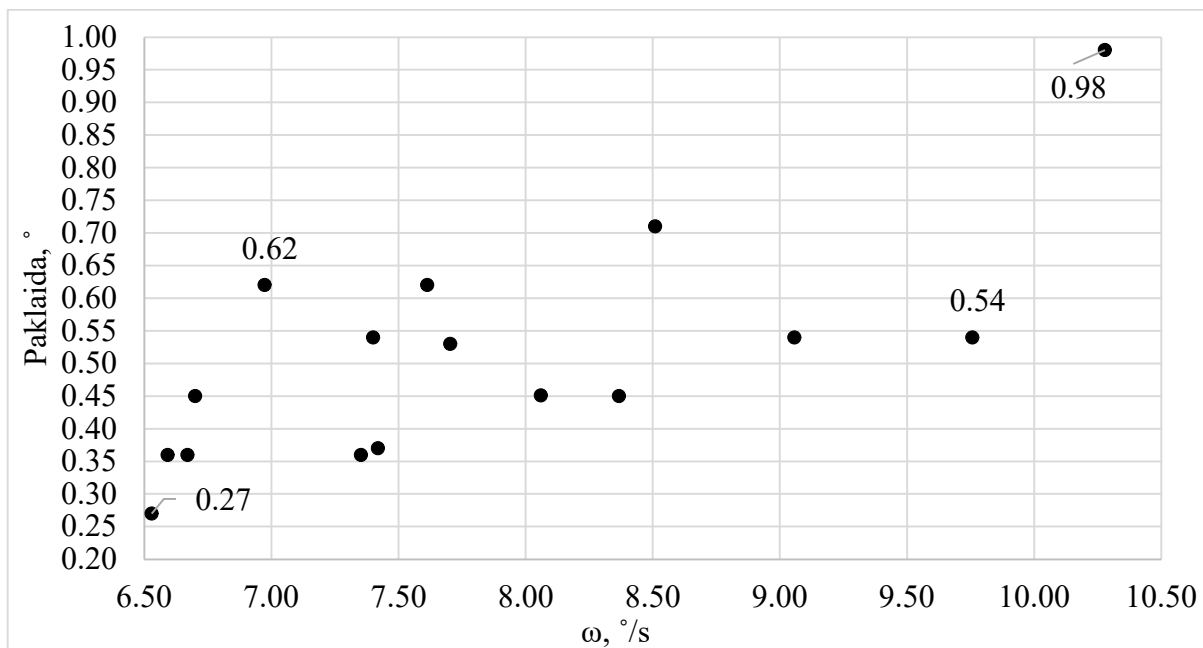


3.4 pav. Valdymo signalų paklaidos priklausomybės nuo bangos formos grafikas

Pagal atliktus eksperimentinius precizinės pjezoelektrinės pavaros bandymus, iš gautų duomenų sudarytas valdymo bangų signalų paklaidos priklausomybės nuo bangos formos grafikas, kuris pavaizduotas 3.4 paveiksle. Iš grafiko matyti, kiekvieną kartą atliekant bandymą, dažniausiai paklaida gaunama skirtinga. Galima pastebėti, kad kuo didesnis dažnis, tuo labiau svyruoja paklaida. Labiausiai svyruoja 13 kHz sinusinė banga nuo $0,63^\circ$ iki $1,59^\circ$, o mažiausiai stačiakampė 1 kHz dažnio banga nuo $-0,05$ iki $-0,04$, neigiama vertė gauna dėl to, kad pavara sustabdoma dar prieš nustatytą vertę. Iš 3.4 paveiksle atvaizduoto grafiko svyravimų, galima spėti, kad paklaidos svyravimai atsiranda, dėl konstrukcijos skirtingų elementų ne preciziškumo, tokių kaip guolio minimali deformacija, guolio laisvumas, atramos pakrypimas, blogas pjezoelektrinio disko prispaudimas, dėl šių konstrukcinių trūkumų, atsiranda didesnis arba mažesnis pagreitis, kuris ir sudaro paklaidos svyravimus.

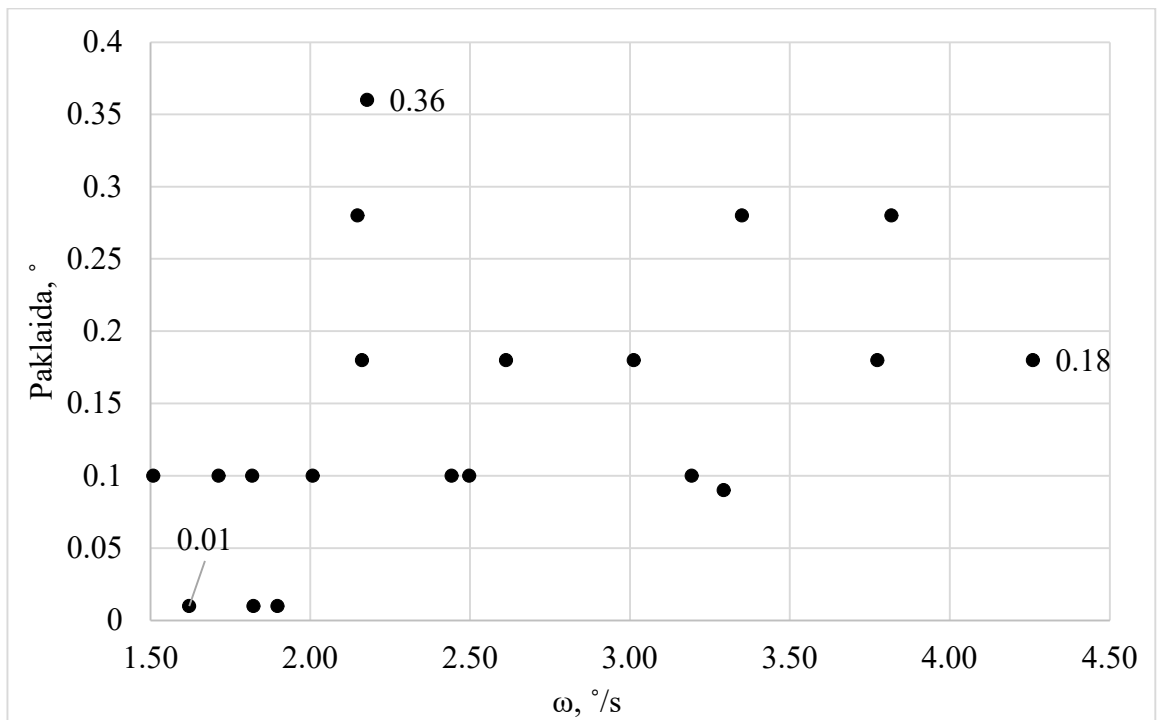
3.2. Pasisukimo paklaidos priklausomybė nuo sukimosi greičio

Pasisukimo paklaidos priklausomybė nuo sukimosi greičio dalyje, tiriama kaip sukimosi greitis įtakoja užduoto sustojimo padėtį, kaip įtakoja sukurtas inercinis momentas sustojimą užduotoje padėtyje. Duomenys surinkti iš 20 atliktų bandymų eksperimentiniu būdu, padėtis nustatyta padėties jutikliu prijungtu prie pavaros.



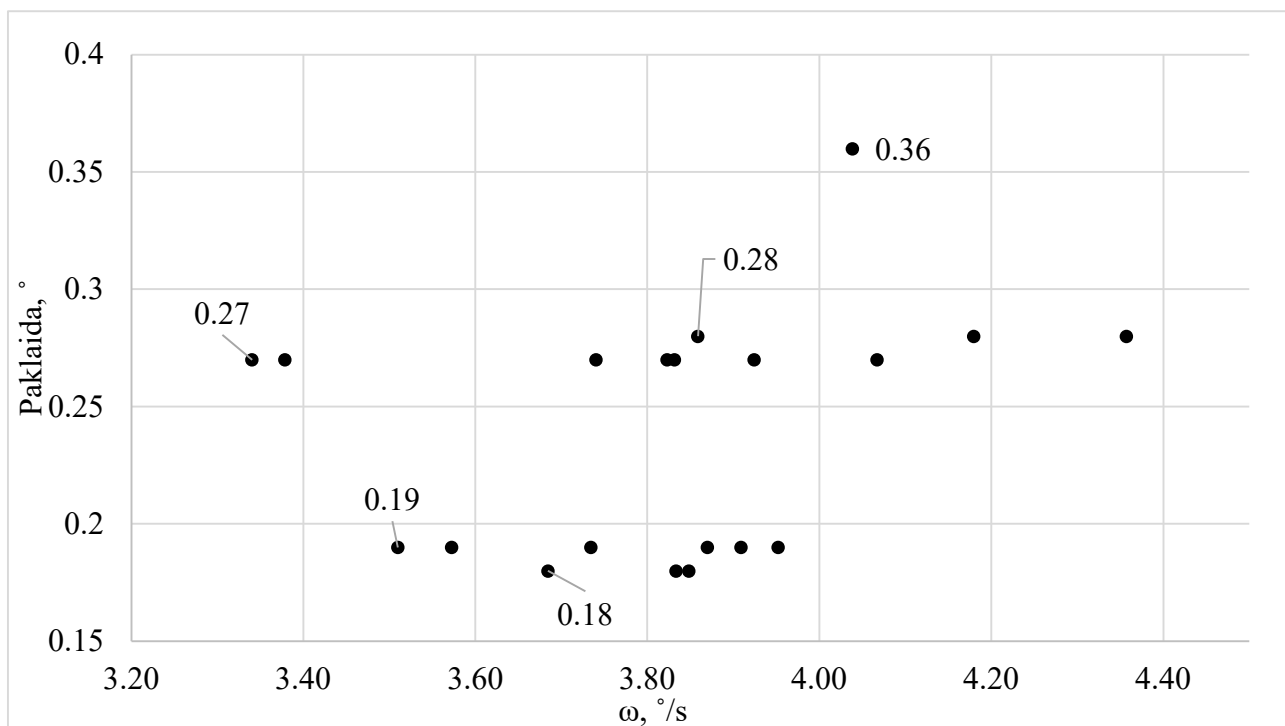
3.5 pav. Sinusinės 8 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama

Iš 3.5 paveiksle pateiktos sinusinės 8 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos nuo priklausomybės diagramoje, kuri sudaryta iš bandymo metu gautų rezultatų, matyti, kad didžiausia pavaros paklaida $0,98^\circ$ buvo, kai sukimosi greitis buvo didžiausias ir siekė $10,28^\circ/\text{s}$ greitį. Mažiausia paklaida išmatuota, kaip pavara sukosi lėčiausiai ir jos greitis buvo $6,53^\circ/\text{s}$, o atjungus signalo simuliaciją ir tiriant jos sustojimo tikslumą nustatyta $0,27^\circ$ paklaida. Taip pat galima pastebėti, kad sukimosi greitis nėra tiesioginis tikslumo kriterijus, kadangi esant $9,76^\circ/\text{s}$ greičiui susidarė $0,54^\circ$ sustojimo netikslumas, o kai greitis siekė $6,97^\circ/\text{s}$, pavaros paklaida nuo užduotos vertės buvo $0,62^\circ$. Tai reiškia, kad esant $2,79^\circ/\text{s}$ greičių skirtumui, paklaida skyrėsi $0,08^\circ$ ir greičiau bandymo metu besisukančio guolio sustojimo kampas buvo tikslesnis, užduoto kampo atžvilgiu.



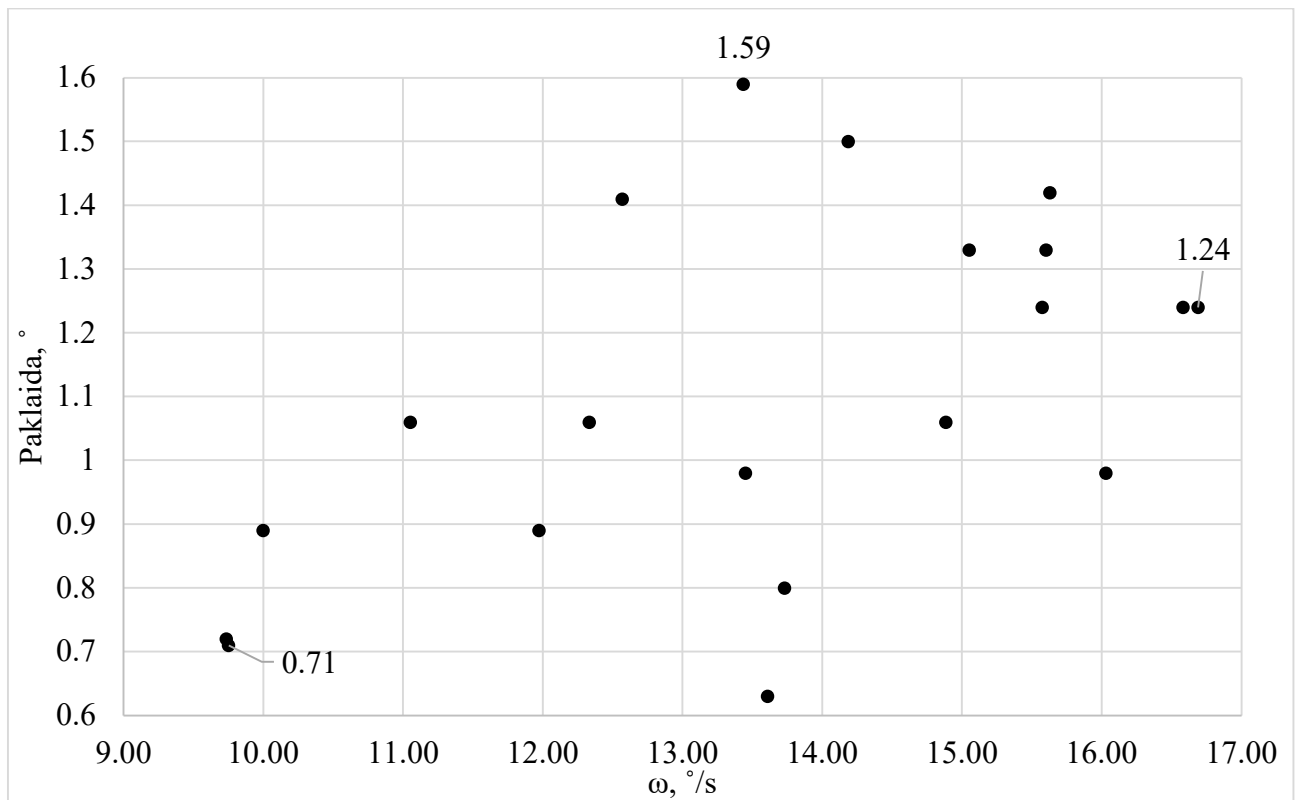
3.6 pav. Sinusinės 11 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama

Iš sudarytos 11 kHz sinusinės valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo dažnio (3.6 paveikslas) diagramos, matyti, jog šios valdymo signalo išmatuotos paklaidos nėra visai priklausomos nuo greičio. Atliktų 20 bandymų metu greitis svyravo nuo 1,51°/s iki 4,26°/s, mažiausia paklaida buvo esant 2,18°/s greičiui, kuri siekia 0,36°. Matyti, kad didžiausia paklaida buvo, kai greitis dvigubai mažesnis, didžiausio bandymo metu buvusio greičio (4,26°/s), o paklaidos skyrėsi, taip pat dvigubai, kai pavaros greitis buvo didžiausias paklaida nuo užduoto sustojimo kampo buvo 0,18°. Iš paklaidos priklausomybės nuo greičio diagramos 3.6 paveiksle, matyti, kad daugiau nei pusė (11 iš 20) eksperimento metu atliktų bandymų pavaros nustatytos pozicijos sustojimo paklaida buvo $\leq 0,1^\circ$. Mažiausia paklaida buvo esant trims skirtingiems greičiams: 1,62, 1,82, 1,9°/s, kai buvo šie greičiai pavaros tikslumas siekė 0,01°/s.



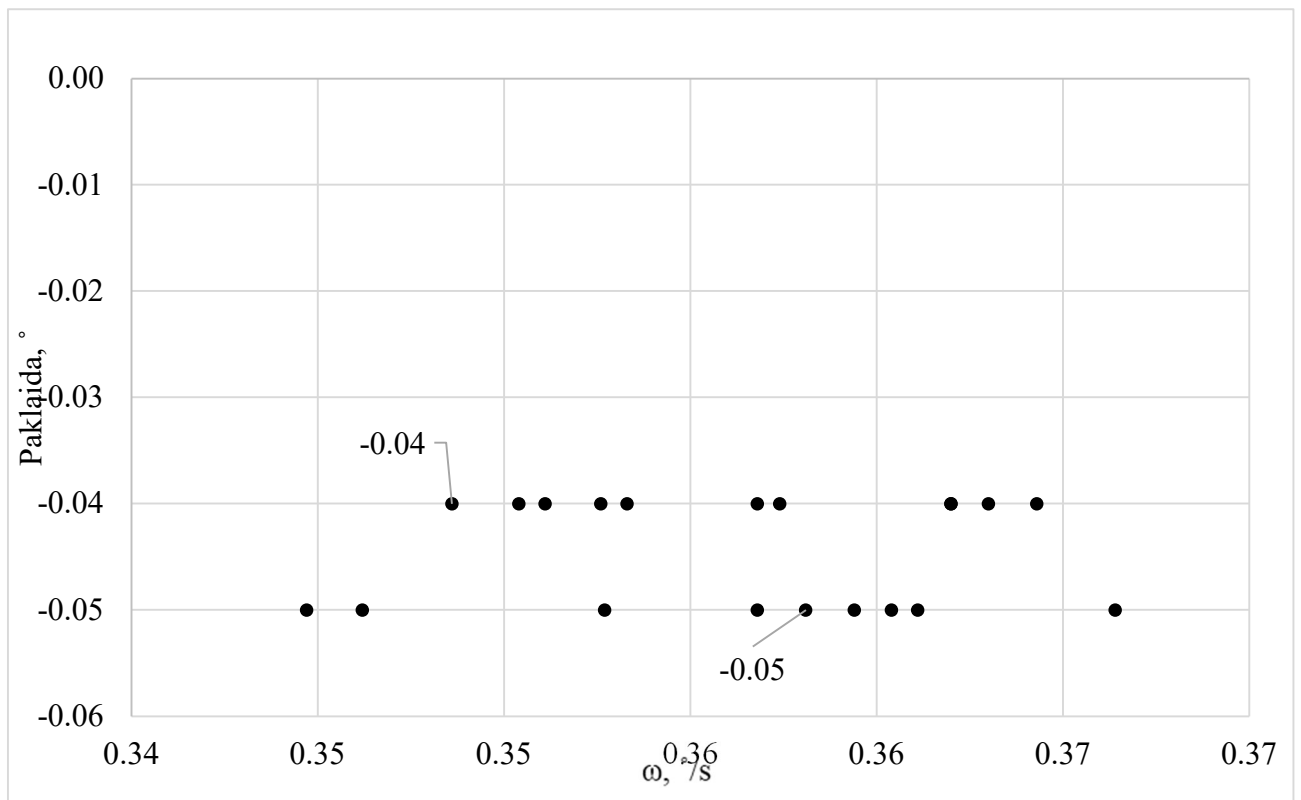
3.7 pav. Sinusinės 12 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama

Iš 3.7 paveiksle pateiktos 12 kHz dažnio sinusinės valdymo signalo bangos priklausomybės nuo greičio diagramoje, kuri sudaryta pagal atliktų eksperimentinių bandymų rezultatus galima pastebėti, kad vyrauja 4 pagrindinės 0,18°, 0,19°, 0,27°, 0,28° paklaidos. Tarp paklaidų susidaręs 0,01° skirtumai, galėjo atsirasti dėl padėties jutiklio verčių su apvalinimo. 12 kHz dažniu sinusinio valdymo signalo veikiamos pavaros mažiausia paklaida yra 0,18°, ši paklaida yra gaunama, su 3,83, 3,85, 3,68°/s greičiais. Galima pastebėti, kad tokiu signalu valdoma pavara sukasi nuo 3,38°/s iki 4,36°/s greičiais, o sustoja tiksliausiai yra valdoma, būtent su vidutiniais šio diapazono greičiais. Didžiausia paklaida buvo pastebėta, kai pavara sukosi 4,04°/s greičiu, šio sukimosi greičio metu buvo užfiksuota 0,36° paklaida. Taip pat galima teigti, kad paklaidos 0,18° ir 0,19° lyginant su 0,27° ir 0,29° paklaidomis yra pasiskirsčiusios vertinant procentais, beveik vienodai. 0,18° – 0,19° paklaidos sudaro 45 %, o 0,27°, 0,28° - 50 % susidariusių paklaidų.



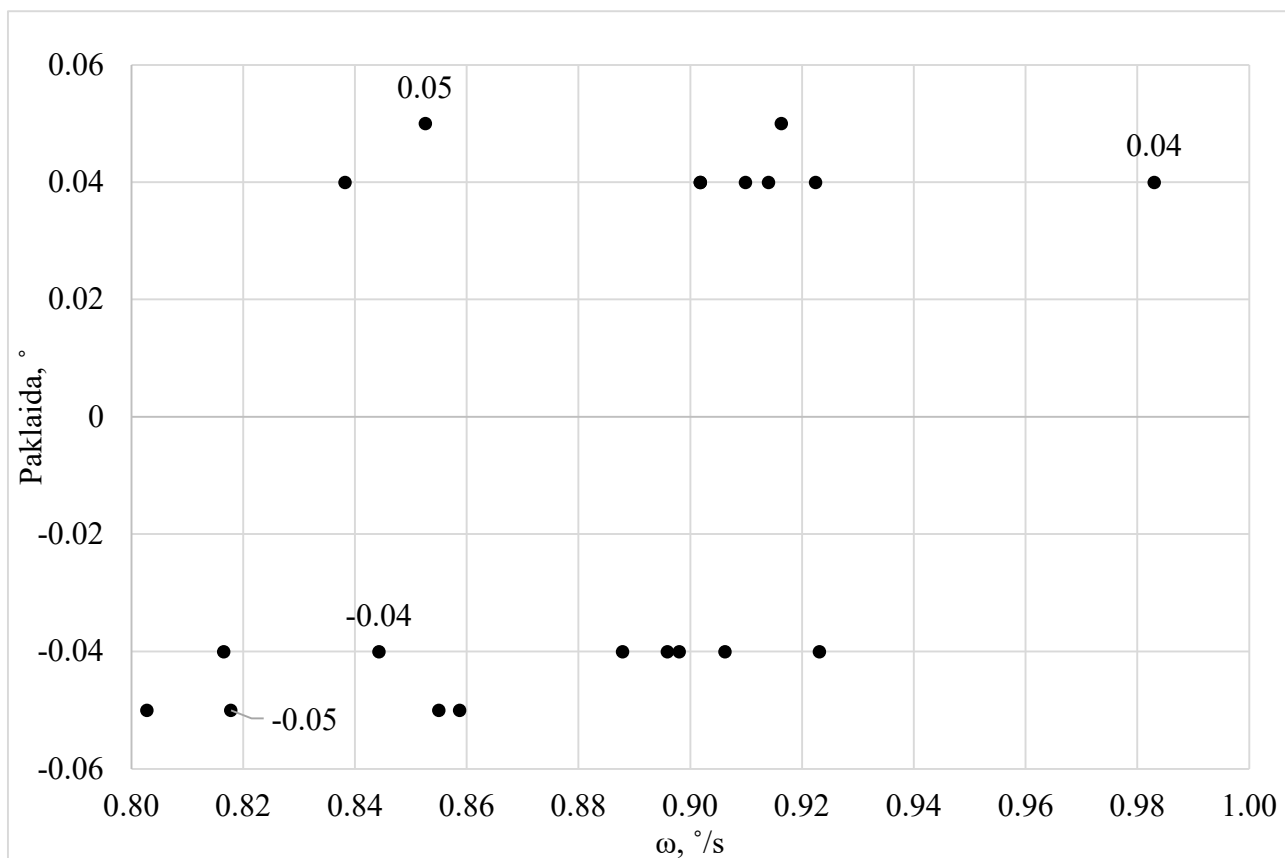
3.8 pav. Sinusinės 13 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama

13 kHz dažnio sinusinės valdymo bangos paklaidos priklausomybė nuo greičio yra labai svyruojanti, tokiu signalu valdomos pavaros paklaida svyruoja nuo $0,72^\circ$ iki $1,24^\circ$. Kaip matyti iš 3.8 paveiksle pateiktos diagramos, kuri yra sudaryta pagal bandymų matavimo rezultatus, kad mažiausia paklaidos $0,71^\circ$ ir $0,72^\circ$, būna tuomet kaip pavara sukasi lėčiausiai tai yra $9,75$ ir $9,74^\circ/\text{s}$ greičiu. Tačiau tokiu signalu valdomos pavaros paklaida svyruoja $0,88^\circ$, o didžiausia paklaida pastebėta esant $13,43^\circ/\text{s}$ greičiui kuri siekė $1,59^\circ$. Pastebėta, kad lyginant su sinusinės bangos diagramomis pateiktomis aukščiau, 13 kHz paklaida ir sukimosi greitis yra didžiausias. Matyti, kad kylant greičiui didėja paklaida, 3.8 paveiksle pateikta 11 kHz dažnio diagrama, kurios atliktais bandymais fiksuotas mažiausias pavaros greitis buvo $1,51^\circ/\text{s}$, o tikslumas siekė $0,1$, lyginant su 3.9 paveiksle pateiktos 13 kHz sinusinės valdymo bangos diagrama, kai greitis buvo didžiausias $16,69^\circ/\text{s}$, paklaida siekė $1,24^\circ$, galima pastebėti, kad greitis skiriasi $15,18^\circ/\text{s}$, o paklaida $1,41^\circ$, lėčiau sukančiosios pavaros tikslumas didesnis.



3.9 pav. Stačiakampės 1 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama

3.9 paveiksle pateikta stačiakampės 1 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama, kuriai sudaryti buvo remtasi bandymo metu atliktais matavimo rezultatais. Tokios pavaros paklaida svyruoja nuo $-0,04^\circ$ iki $-0,05^\circ$. Matyti, kad pavara sustoja dar prieš jai užduotą vertę dėl programos valdymo kodo algoritmo ir padėties jutiklio rezoliucijos. Galima spręsti, kad pavara veikia menkas inercijos momentas, nes sustoja iškart, kai yra nutraukiamas valdymo signalas. Pavaros sukimosi greitis svyruoja nuo $0,35^\circ/\text{s}$ iki $0,37^\circ/\text{s}$, galima pastebėti, kad greičio pokytis labai minimalus, o ir matavimo rezultatai yra vienodi. Galima spręsti, kad esant mažesniai greičiui pavara sustoja tiksliau užduotos vertės, kadangi ją veikia mažesnis inercijos momentas, kuris proporcingai didėja priklausomai nuo sukimosi greičio.

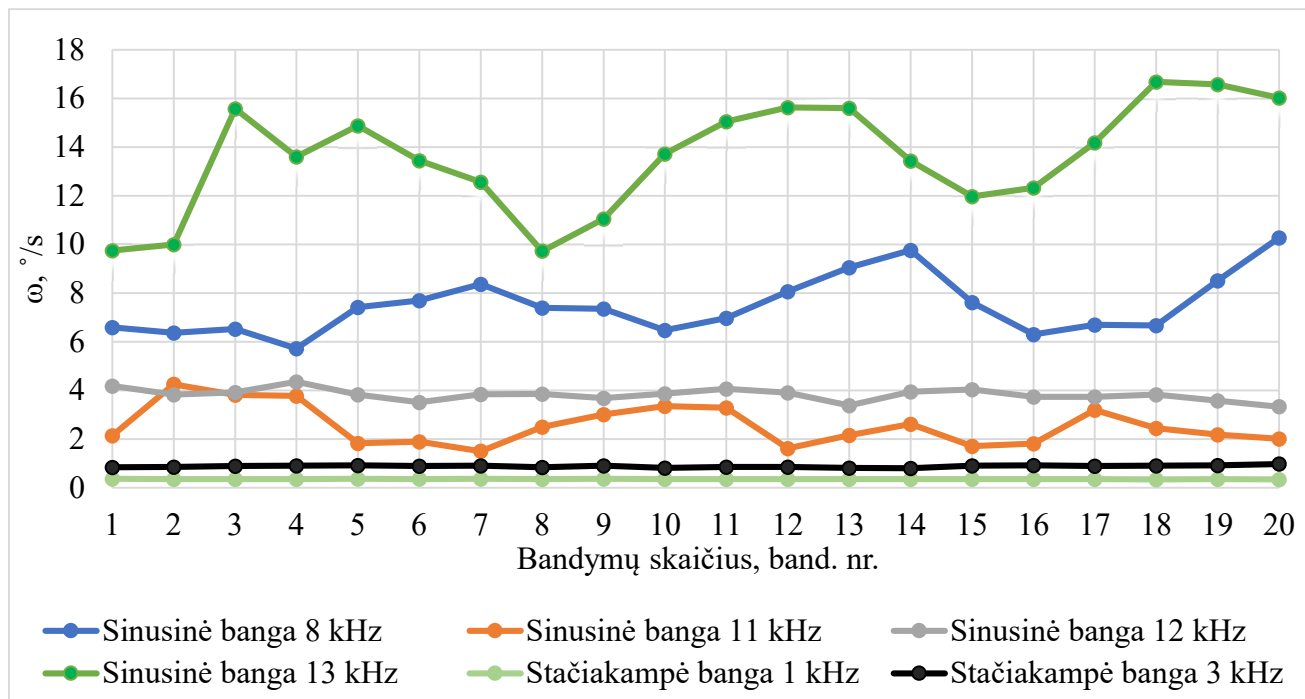


3.10 pav. Stačiakampės 3 kHz dažnio valdymo bangos paklaidos priklausomybės nuo greičio diagrama

Remiantis 3.10 paveiksle pateiktos 3 kHz dažnio stačiakampės valdymo bangos signalo greičio priklausomybės nuo greičio duomenimis, matyti, kad vyrauja 4 paklaidos $-0,04^\circ$, $-0,05^\circ$, $0,04^\circ$ ir $0,05^\circ$. Sukimosi greitis svyruoja nuo $0,82^\circ/\text{s}$ iki $0,98^\circ/\text{s}$. Lyginant su 3.9 paveiksle pateiktos stačiakampės 1 kHz dažnio paklaidos priklausomybės nuo greičio, čia atsiranda teigiama paklaida. Tai reiškia, kad programos kodui nutraukus valdymo signalą, pavara dar dėl inercijos sukimo momento, kai kuriais bandymais pasisukdavo. Tačiau paklaida vis tiek išlieka vienodos vertės. $0,04$ ir $0,05^\circ$. Pavara valdoma 1 ir 3 kHz stačiakampės bangos signalais yra tiksliausia, tačiau mažiausio sukimosi greičio.

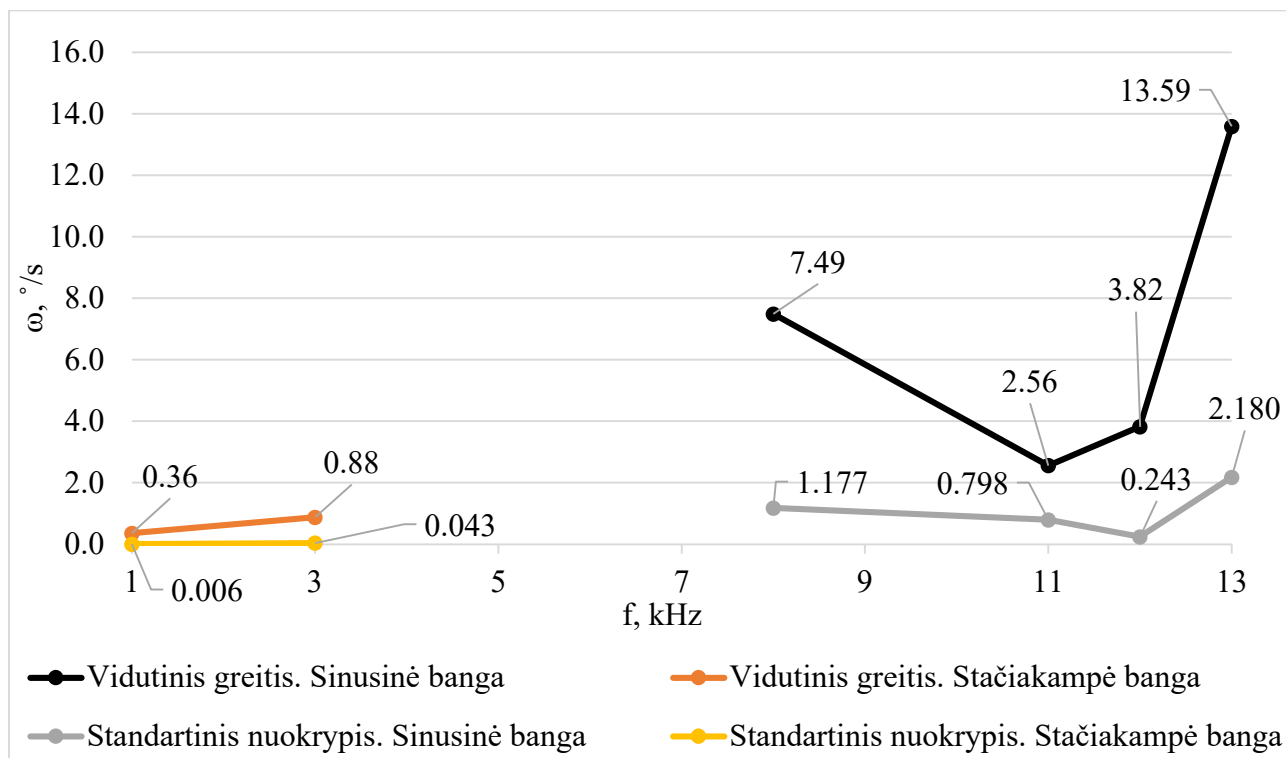
3.3. Sukimosi greičio priklausomybė nuo valdymo bangos ir dažnio

Šiame skyriuje apžvelgiama, kaip sukimosi greitis priklauso nuo dažnio ir veikiamos signalo bangos tipo. Tiriama, kaip didėjant ar mažėjant dažniams keičiasi sukimo greitis, kaip tai įtakoja valdymo signalo banga, pateikiama sukimosi greičio priklausomybės nuo dažnio bandymo grafikai.



3.11 pav. Valdymo signalų greičio priklausomybė nuo bangos formos grafikas

Iš 3.11 paveiksle pateikto valdymo signalo greičio priklausomybės nuo bangos formos grafiko, kuris sudarytas pagal atliktų bandymų rezultatus valdant skirtingais valdymo signalais, matyti, kad didžiausias greitis yra sinusinės 13 kHz dažnio valdymo signalo bangos, jis siekia nuo $9,74^{\circ}/s$ iki $16,69^{\circ}/s$. Iš pateikto grafiko matyti, kad kuo didesnis dažnis, tuo labiau svyruoja pavaros greitis skirtingais bandymo kartais. Pats nestabiliausias yra 13 kHz sinusinis valdymo signalas, o pats stabiliausias greitis yra stačiakampės 1 kHz dažnio valdymo bangos signalas, kurio greitis svyruoja nuo $0,34^{\circ}/s$ iki $0,37^{\circ}/s$. Galima pastebėti, nepaisant to, kad sinusinio 12 kHz dažnis yra didesnis už 11 kHz sinusinio valdymo signalo dažnį ir sukimosi greitis yra didesnis, bet 12 kHz dažnio sinusinio valdymo signalo dažnio greitis yra stabilesnis.



3.12 pav. Sinusinių ir stačiakampių valdymo signalų bangų vidutinio greičio ir standartinio nuokrypio priklausomybių nuo dažnio grafikas

Iš 3.12 paveiksle pateikto sinusinių ir stačiakampių valdymo signalų bangų vidutinio greičio ir standartinio nuokrypio priklausomybių nuo dažnio grafiko matyti, kad dažniui didėjant gaunamas didesnis sukimosi greitis, išskyrus, 11 ir 12 kHz dažniais, kai greitis sumažėja ir ties 13 kHz vėl smarkiai kyla. Didžiausias vidutinis sukimosi greitis pagal grafike pateiktus vidutinius sukimosi greičius yra, kai pavara valdoma 13 kHz dažniu ir siekia 13,59°/s, o mažiausias, kai yra stačiakampis 1 kHz valdymo signalas, kurio vidutinis sukimosi greitis buvo 0,36°/s.

Iš sinusinių ir stačiakampių valdymo signalų bangų vidutinio greičio ir standartinio nuokrypio priklausomybės nuo dažnio grafiko 3.12 paveiksle matyti, kad pavara stabiliausia ir labiausia nuspėjama, kaip yra valdoma 1 kHz stačiakampės bangos valdymo signalo. Šio veikiamo signalo standartinis nuokrypis yra 0,006°/s. Didėjant dažniui didėja ir greičio standartinis nuokrypis, o kai pavara veikiama 13 kHz dažniui standartinė nuokrypa yra didžiausia ir siekia 2,180°/s. Galima manyti, kuo greičiau sukasi pavara tuo jos greitis būna nestabilesnis. Lyginant vidutinio sukimosi greičio kreives su standartinio nuokrypio, matyti, kad grafiko formos yra panašios, išskyrus kaip sukasi 12 kHz dažnio sinusine valdymo banga, kai standartinis nuokrypis mažėja iki 0,243°/s, nors sukimosi greitis išaugo iki 3,82°/s. Galime sakyti, kad pavaros standartinį nuokrypį įtakoja, pavaros sukimosi greitis.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Precizinės pjezoelektrinės pavaros paklaidą lemia jo valdymo signalas. Iš atliktų tyrimų nustatyta, kad pavaros nuokrypis mažiausias, kai veikia su 1 ir 3 kHz stačiakampės bangos valdymo signalais, tokiu valdymo metu pavaros vidutinis nuokrypis siekia $0,045^\circ$.
2. Pastebėta, kad tiesiogiai nuokrypiui įtaką turi sukimosi greitis ir pavaros konstrukcija. Esant didžiausiam sukimosi greičiui $16,69^\circ/\text{s}$ pavaros sustojimo paklaida yra $1,24^\circ$, tokį sukimosi greitį sukūrė 13 kHz sinusinio valdymo signalo banga. Matoma, kad tokio pat signalo valdoma pavara gauna didesnę paklaidą $1,36^\circ$, esant $13,43^\circ/\text{s}$ greičiui. Galima matyti, kad tuo metu veikė didesnis inercijos momentas, dėl pavaros konstrukcijos netobulumo: nevienodai spaudžiamas anglies pluošto strypas į guolį, pats guolis turi laisvumą ir nėra visiškai išcentruotas vidurio ašies.
3. Pastebėta, kad pjezoelektrinė precizinė pavara turi mažą nuokrypą, kuri tyrimų atveju labiausiai priklausė nuo panaudoto kampo jutiklio skiriamosios gebos, t. y. $0,09^\circ$, ir pritaikius didesnės skiriamosios paklaidos jutiklį galėtų būti mažesnė.
4. Sudarant maketą pastebėta, kad valdant skirtingu valdymo signalu, pavaros sukamasis judesys sukuriamas skirtingais dažniais. Sinusinės valdymo bangos signalo bandymo metu, pavara pradeda suktis nuo 8 kHz dažnio, pjūklinė – nuo 5 Hz, o stačiakampė – 10 Hz dažnių. Pjūklinės ir stačiakampės bangos metu stipresnis sukamasis judesys, esant mažam dažniui lyginant su sinusiniu valdymo signalu, nes valdant stačiakampe ir pjūklinei valdymo signalo bangai pavara veikia kaip inercinė – smūginė, o sinusinei – tik kaip inercinė.
5. Rekomenduojama naudoti signalo generatorių (ne leistuvą) precizinei pavarai sudaryti, nes valdymo signalo bangos yra iškraipomos ir neatitinka joms keliamų reikalavimų: turi daug triukšmų, nėra nustatytos formos. Valdymo signalo stiprinimo tikslu pasirinkti stiprintuvą, kuris nedaro signalo diskretizavimo, nes dideliu dažniu šio proceso apdoroti nespėja. Konstrukciją daryti preciziško tikslumo ir užtikrinti pjezokeraminio disko su strypu, idealų prispaudimą į sukamą guolį. Tikslesniems matavimams atlikti pasirinkti didesnės nei 12 bitų rezoliucijos padėties jutiklį.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Bubulis A. ir Jūrėnas (2008) V. *Pjezomechanika*. Vilnius pedagoginio universiteto leidykla;
2. Smilgevičius A. (2008) *Elektromechaniniai mechatronikos elementai*. Vilniaus pedagoginio leidykla;
3. *How To Drive Piezoelectric Actuators*. <https://blog.piezo.com/how-to-drive-piezoelectric-actuators> ;
4. Yu Wang, Cheng-liang Pan, Tian-liang Dai, Hao-jie Xia, Lian-dong Yu (2019). Design of a resonant-type inertia drive linear motor based on piezoelectric asymmetric tuning-fork actuator. *SPAWDA Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Develope Applications*, 13, 1-5;
5. Rob Carter, Richard Kensley. *Introduction to Piezoelectric Transducers*. <https://blog.piezo.com/hubfs/Manuals/Introduction-to-Piezoelectric-Transducers-Carter-Kensley-2022.pdf> ;
6. Mažeika D., Vasiljev P., Borodinas S., Bareikis R., Yang Y. (2018). Small size piezoelectric impact drive actuator with rectangular bimorphs. *Sensors and Actuators A: physical journal*, , 76-84;
7. B. Chandra Sekher, B. Dhanalakshimi, B. Srinvasa Rao, S. Ramesh, K. Vekata Prasad, P.S.V. Subba Rao and B. Parvatheeswara Rao (2021). Piezoelectricity and Its Applications. Multifunctional Ferroelectric Materials. *United Kingdom IntechOpen*;
8. S. Mohith, Adithya R. Upadhya , Karanth P. Navin, S. M. Kulkarni and Muralidhara Rao (2020). Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion their applications: a review. *Smart materials and Structures*, 30 psl;
9. Lučinskis. R (2014). *Pjezoelektrinių keitiklių su įvairiakrypčiais poliarizavimo vektoriais virpesių tyrimas*. Vilniaus technika;
10. Čėponis A (2018). *Research of piezoelectric energy harvesting system based on catilvers with irregular cross-sections*. Vilniaus technika;
11. Mažeika D., Vasiljev P., Yang T., Čėponis A., Bareikis R., Struckas A., Borodinas S. (2022). Disc type piezoelectric actuator for optical lens positioning. *Actuator*. 260-263;
12. Čėponis A. ir Mažeika D. (2015). Piezoelectirc systems as an alternative energy source. *Mokslas – Lietuvos Atietis / Science – Futrure of Lithuania*, 6 (6), 676-681;
13. Spanner K. And Koc B (2016). Piezoelectric Motors, and Overview. *Actuators*, 5(1);
14. Han L., Yu L., Pan, C, Zhao H., Jiang Y. (2018). A novel impact rotary-linear motor based on decomposed screw-type motion of piezoelectric actuator. *Applied Sciences*, 8(12), 2492;

15. Mashimo, T.; Toyama, S. (2010). Rotary-Linear Piezoelectric Microactuator with a cubic stator of side length 3,5 mm. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 8, 1825-1830;
16. PiezoDrive. *PDL200 Low Noise Voltage Amplifier*. <https://www.piezodrive.com/drivers/pdl200-low-noise-voltage-amplifier/>;
17. BOS1901CQR. Mouser Electronics. <https://hu.mouser.com/ProductDetail/Boreas-Technologies/BOS1901CQR?qs=eP2BKZSCXI7n2B%2Ffewt55Ug%3D%3D>;
18. Spectrum Control GaN, GaAs MESFET, E-pHEMT, LDMOS, Class A, Class AB, Class C, Broadband, hybrid, fully-modifiable, RF, microwave power amplifier <https://www.spectrumcontrol.com/products/subsystems/signal-conditioning/power-amplifiers/high-power-amplifier-modules/>;
19. Digitalas. Impulsinis maitinimo šaltinis 24 V 5A. <https://digitalas.lt/parduotuve/impulsiniai-maitinimo-saltiniai/impulsinis-maitinimo-saltinis-24v-5a/>;
20. PiezoFLO. User Manual. <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/3841176/Data-Sheets/piezoflo-active-cooling-user-manual.pdf>;
21. Piezo. Piezo Linear Amplifier Manual EPA-104. <https://info.piezo.com/hubfs/Manuals/EPA104%20MANUAL.pdf>;
22. Čeponis A., Mažeika D., Bansevicius R., Bakanauskas V. (2016). Piezoelectric actuator with traveling wave waveguide. *Journal of Vibroengineering*, 5, 2936-2946;
23. Bansevicius R. (2011) Research of Dynamic Characteristics of Piezoelectric Actuator Used in Flow Control Device. *Journal of Vibroengineering*, 4, 823-828;
24. Changhai R. (2007). Tracking Control Method of Piezoelectric Actuator for Compensating Hysteresis and Creep. *2007 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Bangkok, Thailand*, 186-190;
25. Elahi H., Eugeni M., Gaudenzi P., Qayyum F., Swati R. F., Khan H. M. (2018). Response of piezoelectric materials on thermomechanical shocking and electrical shocking for aerospace applications. *Microsystem Technologies*, 24, 3791-3798;
26. Bansevicius R., Kulvietis G., Mažeika D. (2016). Piezoelectric active bearings and supports: structures, characteristics and applications. *Archive of Applied Mechanics*, 86, 1697–1706;
27. Janutaitė-Bogdanienė J. (2019). *Control of Piezobots trajectories for nanosatellite stabilization*. Vilniaus technika;
28. Liu G. Y. and Xu G. Y (2014). Design and Research of Piezoelectric Ceramics Drive Power. *Sensors & Transducers*, 1, 28-32;

29. Boontaklang S. and Chompoo-Inwai C. (2019). Automatic Resonance-Frequency Tuning and Tracking Technique for a 1MHz Ultrasonic-Piezoelectric-Transducer Driving Circuit in Medical Therapeutic Applications Using dsPIC Microcontroller and PLL Techniques. *International Journal of Intelligent Enegeering & Systems*, 12(6), 14-24;
30. Kybartas D. (2000). *Pjezoelemento radialinių rezonansų ir antirezonansų analizė baigtinių elementų metodu*. Ultragarsas;
31. Wang L., Chen W., Liu J., Deng J., Liu Y. (2019). A review of recent studies on not-resonant piezoelectric actuators. *Mechanical systems and signal pricessing*, 133.

PRIEDAI

A priedas. Precizinės pjezoelektrinės pavaros modelio programinės įrangos kodas;

B priedas. Precizinės pjezoelektrinės pavaros greičio matavimo programinis kodas;

C priedas. Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo maketas.

A priedas

Precizinės pjezoelektrinės pavaros modelio programinės įrangos kodas

Pagrindinė programos kodo dalis

```
#include "Arduino.h"
#include "Wire.h"
//DFPlayer-----
#include "SoftwareSerial.h"
#include "DFRobotDFPlayerMini.h"
SoftwareSerial mySoftwareSerial(6, 5); // RX, TX
DFRobotDFPlayerMini myDFPlayer;
void printDetail(uint8_t type, int value);
int irasas;
//LCD ekranas-----
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
//Enkoderis-----
#include "AS5600.h"
AS5600 as5600;
//Laikas
unsigned long previousMillis = 0;
unsigned long currentMillis;
const unsigned long interval = 1000; // laiko intervalas milisekundėmis
bool spinning = false;
//Mygtukai-----
#define BackButton 10
#define DownButton 11
#define UpButton 12
#define SelectButton 13
byte lastBackButtonState = LOW;
byte lastDownButtonState = LOW;
byte lastUpButtonState = LOW;
byte lastSelectButtonState = LOW;
unsigned long lastTimeBackButtonStateChanged = 0;
unsigned long lastTimeDownButtonStateChanged = 0;
unsigned long lastTimeUpButtonStateChanged = 0;
unsigned long lastTimeSelectButtonStateChanged = 0;
unsigned long debounceDuration = 50; // millis
//Sukimo kintamieji-----
float daugiau = -0.088;
float maziau = 0.088; //(daryti 0.1?)
float Uzduodamas_laipsnis;
float EndPasukimas = 50;
float Pasukimas;
int Kampas_1;
int sukimas; // sukimo kintmasis
int Spining;
float esamas_kampas; // spausdinamas esamas kampas, atvaizduojami enkoderio duomenys
//Menu kintamieji-----
int menuDaznis = 0; // counter for the number of button presses
int menuGarsas = 0;
int menuKampas = 0;
int menuBanga = 1;
int menu = 0; // kintamasis kuris atsako už select/back mygtukus
void setup() {
  lcd.init();
  lcd.clear();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("AS5600_VER:");
  lcd.setCursor(0,10);
  lcd.print(AS5600_LIB_VERSION);
  delay(2000);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("DAUMANTAS");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("KRIAUCIUNAS");
  delay(2000);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("GRUPE: AUSfm21");
  delay(2000);
  lcd.clear();
}
```

```

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("INICIJUOJAMA...");
delay(4000);

Serial.begin(9600);
pinMode(BackButton, INPUT);
pinMode(DownButton, INPUT);
pinMode(UpButton, INPUT);
pinMode(SelectButton, INPUT);
mainBanga();
//Garso leistuvo-----
mySoftwareSerial.begin(9600);
myDFPlayer.begin(mySoftwareSerial);
//Enkoderio-----
Wire.begin();
as5600.begin(4); // set direction pin.
as5600.setDirection(AS5600_CLOCK_WISE); // default, just be explicit.
}
void loop() {
  if (Spining == 1 && spinning) { // tikriname ar pradėjo suktis
    spinning = false;
    previousMillis = millis(); // išsaugome laiką, kada pradėjo suktis
  }
  else if (Spining == 0 && !spinning) { // tikriname ar nutraukė virstimą ratuka
    spinning = true;
    Serial.print("Programos vykdymo laikas: ");
    Serial.print(millis() - previousMillis);
    Serial.println(" milisekundžių");
  }
  //Irašo paleidimas/sustabdymas-----
  if (menuBanga == 1){
    irasas = menuDaznis;}
  if (menuBanga == 2){
    irasas = menuDaznis+12;}
  if (menuBanga == 3){
    irasas = menuDaznis+24;}
  if (menuBanga == 4){
    irasas = menuDaznis+36;}
    if ((esamas_kampas +50) < 360 && menu==4){
      Kampas_1 = 1;}
      if(Kampas_1 == 1){
        EndPasukimas = Pasukimas - esamas_kampas;
      }
      else if ((esamas_kampas + 50) > 360 && menu==4 && Kampas_1 == 0){
        EndPasukimas = (Pasukimas + esamas_kampas) - 310;
      }
  if (EndPasukimas <= 0.1){
    myDFPlayer.pause(); //pause the mp3;
    Spining = 0;}
  //Enkoderio reikšmės ir laipsnio nustatymas-----

  if(menuKampas >= 1){
    lcd.setCursor(10, 0);
    esamas_kampas = as5600.rawAngle() * AS5600_RAW_TO_DEGREES;
    lcd.print(esamas_kampas);
    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print(Pasukimas);
  }

  if (Spining == 0 && menu == 3){
    Pasukimas = esamas_kampas + 4 ;
    if(Pasukimas > 360 && Spining == 0){
      Pasukimas = esamas_kampas - 354;}}
  //Žemyn mygtukas-----
  if (millis() - lastTimeDownButtonStateChanged > debounceDuration) {
    byte DownButtonState = digitalRead(DownButton);
    if (DownButtonState != lastDownButtonState) {
      lastTimeDownButtonStateChanged = millis();
      lastDownButtonState = DownButtonState;
      if (DownButtonState == LOW && menuDaznis == 0) {
        menuBanga++;
        mainBanga();}
      if (menuBanga > 4 && DownButtonState == LOW) {
        menuBanga = 1;
        mainBanga();}
      if (DownButtonState == LOW && menu == 1 ) {
        menuDaznis ++;
        mainDaznis();}
      if (menuDaznis > 12 && DownButtonState == LOW && menu == 1) {
        menuDaznis = 1;
        mainDaznis();}
    }
  }
}

```

```

        if (DownButtonState == LOW && menu == 2) {
            menuGarsas ++;
            mainGarsas();
            if (menuGarsas > 1 && DownButtonState == LOW && menu == 2) {
                menuGarsas = 1;
                mainGarsas();
            }
            if ( menu == 3 && DownButtonState == LOW){
                Pasukimas = Pasukimas + 1;}}}
//Aukštyn mygtukas-----
if (millis() - lastTimeUpButtonStateChanged > debounceDuration) {
    byte UpButtonState = digitalRead(UpButton);
    if (UpButtonState != lastUpButtonState) {
        lastTimeUpButtonStateChanged = millis();
        lastUpButtonState = UpButtonState;
        if (UpButtonState == LOW && menuDaznis == 0) {
            menuBanga--;
            mainBanga();
        }
        if (menuBanga < 1 && UpButtonState == LOW) {
            menuBanga = 4;
            mainBanga();
        }
        if (UpButtonState == LOW && menu == 1) {
            menuDaznis--;
            mainDaznis();
            if (menuDaznis < 1 && UpButtonState == LOW && menu == 1) {
                menuDaznis = 12;
                mainDaznis();
            }
        }
        if (UpButtonState == LOW && menu == 2) {
            menuGarsas --;
            mainGarsas();
            if (menuGarsas < 1 && UpButtonState == LOW && menu == 2) {
                menuGarsas = 1;
                mainGarsas();
            }
            if (menu == 3 && UpButtonState == LOW){
                Pasukimas = Pasukimas + 0.01;}}}
//Pasirinkimo mygtukas-----
if (millis() - lastTimeSelectButtonStateChanged > debounceDuration) {
    byte SelectButtonState = digitalRead(SelectButton);
    if (SelectButtonState != lastSelectButtonState) {
        lastTimeSelectButtonStateChanged = millis();
        lastSelectButtonState = SelectButtonState;
        if (SelectButtonState == LOW && menu < 4) {
            menu++;
            if (menu == 1 && SelectButtonState == LOW && menuDaznis < 1){menuDaznis ++; mainDaznis();}
            if (menu == 2 && SelectButtonState == LOW && menuGarsas < 1){
                menuGarsas ++;
                mainGarsas();
            }
            if (menu == 3 && SelectButtonState == LOW && menuKampas < 1 ){
                menuKampas = 1;
                mainKampas();
            }
        }
        if (esamas_kampas != Pasukimas && SelectButtonState == LOW && menu == 4){
            myDFPlayer.play(irasas); //Play the first mp3
            myDFPlayer.enableLoop(); //enable loop
            Spining = 1;}}}
//Grįžimo mygtukas-----
if (millis() - lastTimeBackButtonStateChanged > debounceDuration) {
    byte BackButtonState = digitalRead(BackButton);
    if (BackButtonState != lastBackButtonState) {
        lastTimeBackButtonStateChanged = millis();
        lastBackButtonState = BackButtonState;
        if (BackButtonState == LOW && menu > 0) {
            menu--;
        }
        if (BackButtonState == LOW && menu == 3){
            myDFPlayer.pause();
            Spining = 0;
            Kampas_1 = 0;
        }
        if (BackButtonState == LOW && menu == 2){
            menuKampas = 0;
            mainGarsas();
        }
        if (BackButtonState == LOW && menu == 1){
            menuGarsas = 0;
            mainDaznis();
        }
        if (BackButtonState == LOW && menu == 0){
            menuDaznis = 0;
            mainBanga();
        }
    }
}
//Garsumo parinkimas-----
if (menu == 3 && menuGarsas == 1){
    myDFPlayer.volume(22); //Set volume value (0~30)}

```

Bangos tipo pasirinkimo meniu kodas

```
void mainBanga() {
  switch (menuBanga) {
    case 1:
      lcd.clear();
      lcd.print(">Sinusine banga" );
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(" Staciakam. bang");
      break;
    case 2:
      lcd.clear();
      lcd.print(" Sinusine banga");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(">Staciakam. bang");
      break;
    case 3:
      lcd.clear();
      lcd.print(">Trikampe banga");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(" Pjukline banga");
      break;
    case 4:
      lcd.clear();
      lcd.print(" Trikampe banga");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(">Pjukline banga");
      break;}}}
```

Dažnio pasirinkimo meniu kodas

```
void mainDaznis(){
  switch (menuDaznis){
    case 1:
      lcd.clear();
      lcd.print(">Daznis: 200Hz" );
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(" Daznis: 1000Hz");
      break;
    case 2:
      lcd.clear();
      lcd.print(" Daznis: 200Hz");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(">Daznis: 1000Hz ");
      break;
    case 3:
      lcd.clear();
      lcd.print(">Daznis: 3000Hz" );
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(" Daznis: 4000Hz");
      break;
    case 4:
      lcd.clear();
      lcd.print(" Daznis: 3000Hz");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(">Daznis: 4000Hz ");
      break;
    case 5:
      lcd.clear();
      lcd.print(">Daznis: 5000Hz");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(" Daznis: 6000Hz");
      break;
    case 6:
      lcd.clear();
      lcd.print(" Daznis: 5000Hz");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(">Daznis: 6000Hz");
      break;
    case 7:
      lcd.clear();
      lcd.print(">Daznis: 7000Hz");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(" Daznis: 8000Hz");
      break;
  }}
```

```

case 8:
    lcd.clear();
    lcd.print(" Daznis: 7000Hz");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(">Daznis: 8000Hz");
    break;
case 9:
    lcd.clear();
    lcd.print(">Daznis: 9000Hz");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" Daznis: 10000Hz");
    break;
case 10:
    lcd.clear();
    lcd.print(" Daznis: 9000Hz");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(">Daznis: 10000Hz");
    break;
case 11:
    lcd.clear();
    lcd.print(">Daznis: 11000Hz");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" Daznis: 12000Hz");
    break;
case 12:
    lcd.clear();
    lcd.print(" Daznis: 11000Hz");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(">Daznis: 12000Hz");
    break;}}

```

Garsumo pasirinkimo meniu kodas

```

void mainGarsas(){
    switch (menuGarsas){
        case 1:
            lcd.clear();
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print(" Garsumas: 100%");
            break;}}

```

Pozicijos atvaizdavimo ir parinkimo ekrane kodas

```

void mainKampas() {
    switch (menuKampas){
        case 1:
            lcd.clear();
            lcd.print("Es.kamp:");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Uzd.kamp:");
            break;}}

```

B priedas

Precizinės pjezoelektrinės pavaros greičio matavimo programinis kodas

```
#include "AS5600.h"
#include "Wire.h"
AS5600 as5600; // use default Wire
int Spining = 0;
unsigned long previousMillis = 0;
unsigned long previousPosition = 0;
//unsigned long currentMillis;
float sukaupstas_kampas;
float esamas_kampas;
float pasukta;
float pradinis_kampas;
bool spinning = false;
int saugomas = 0;
float saugomas_laipsnis;
//Mygtukai-----
#define StartButton 13
byte lastStartButtonState = LOW;
unsigned long lastTimeStartButtonStateChanged = 0;
unsigned long debounceDuration = 50; // millis
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  as5600.begin(4); // set direction pin.
  as5600.setDirection(AS5600_CLOCK_WISE); // default, just be explicit.
  pinMode(StartButton, INPUT);
}
void loop(){
  // Serial.println(esamas_kampas);
  esamas_kampas = as5600.rawAngle() * AS5600_RAW_TO_DEGREES;
  if (millis() - lastTimeStartButtonStateChanged > debounceDuration) {
    byte StartButtonState = digitalRead(StartButton);
    if (StartButtonState != lastStartButtonState) {
      lastTimeStartButtonStateChanged = millis();
      lastStartButtonState = StartButtonState;
      if (StartButtonState == LOW) {
        Spining = 0;
        saugomas = 0;
        saugomas_laipsnis = 0;
        Serial.print("kampas pradėjus:");
        Serial.println(esamas_kampas);
        pradinis_kampas = esamas_kampas;
        sukaupstas_kampas = 0; // nustatome sukaupią kampa į pradžią
        previousPosition = esamas_kampas; // nustatome pradinę padėtį
      }
    }
  }
  if ( Spining == 0 && esamas_kampas == 0) {
    saugomas_laipsnis = 360 - pradinis_kampas;
    if (saugomas_laipsnis>0){
      saugomas = 1;}
  }
  if (saugomas == 0) {
    pasukta = esamas_kampas - pradinis_kampas;
  }
  else {
    pasukta = saugomas_laipsnis + esamas_kampas;
  }
  if (Spining == 0 && !spinning) { // tikriname ar pradėjo suktis
    spinning = true;
    previousMillis = millis(); // išsaugome laiką, kada pradėjo suktis
  }
  else if (Spining == 1 && spinning) { // tikriname ar nutraukė virsimą ratuką
    spinning = false;
    Serial.print("Programos vykdymo laikas: ");
    Serial.println(millis() - previousMillis);
    Serial.print("Pasukta laipsniais: ");
    Serial.println(pasukta);
    Serial.print("Kampas po pasukimo: ");
    Serial.println(esamas_kampas);
    Serial.print("saugomas laipsnis:");
    Serial.println(saugomas_laipsnis);
    Serial.println(saugomas);
  }
  if ((millis() - previousMillis) > 10000){
    Spining = 1;}}
```

C priedas

Precizinės pjezoelektrinės pavaros tyrimo maketas